INVESTIGACION y CIENCIA

¿COMO SERIAN, SI HUBIERA, OTROS MUNDOS?

LA ASPIRINA

EL CUCO Y SU PATRON: EVOLUCION A LA PAR

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



CATASTROFE POR EFECTO DOMINO

MARZO 1991
600 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa



Marzo de 1991 Número 174

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Ramón Pascual: *Mundos en torno a otras estrellas*; Luis Bou: *Criticalidad auto-organizada*, *Calcular la realidad*, *Juegos matemáticos* y *Juegos de ordenador*; Luis Cornudella: *Plegamiento de las proteínas*; Nicolás García Tapia: *La obra de la catedral de Florencia*; Ana Mª García: *La aspirina*; Joandoménec Ros: *Coevolución del cuco y sus patrones*; J. Vilardell: *Hace...*

Ciencia y sociedad:

J. E. Llebot y José M. García de la Mora

Ciencia y empresa:

Manuel Puigcerver

Libros:

Carlos Sánchez del Río, José A. Cabezas y Claude Hannoun, Luis Alonso, Josep Pla y José Mª Sancho.

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
8-12	Andrew Christie
13	Anneila I. Sargent y Steven Beckwith
14	Andrew Christie
19	Quesada/Burke y Domino F/X
20	Eric A. Myers
21	John R. Deecken
22	Glenn A. Held, Centro Thomas J. Watson de IBM
24	John R. Deecken
25	Galen Rowell/Mountain Light
26-27	Frederic M. Richards y Paul E. Vogt, Universidad de Yale
28	George V. Kelvin
29	George V. Kelvin y George Rose, Univ. Pennsylvania
30	George V. Kelvin; cortesía de Jane S. Richards, Univ. Duke
31-32	George V. Kelvin
33	Jay W. Ponder
44-45	Mike Kagan, Monkmeyer Press
46	G. Barone, Monkmeyer Press
47	*Zibaldone*, Buonaccorso Ghiberti, manuscrito inédito BR 228, Florencia
48	George Retseck (*arriba*); *Brunelleschi*, P. Sanpaolesi (*abajo*)
49	George Retseck
50	*Leonardo da Vinci*: *Engineer and Architect*, Museo de Bellas Artes de Montreal
53-55	Santiago Arribas, Expogràfic
56	S. Arribas (*arriba*); S. Arribas y Expogràfic (*abajo*)
57	S. Arribas y Expogràfic (*arriba*); C. Martínez Roger y E. Páez (*abajo*)
58	M. Prieto y A. Varela
59-60	Santiago Arribas
63	Pamela J. Harper
64-68	Dana Burns-Pizer
71	Michael Leach
72-74	Patricia J. Wynne
75	Oxford Scientific Films/ Animals, Animals (*arriba*); Ian Wyllie
76	Patricia J. Wynne
78-79	Robert B. Wishelmson
80-81	Peter Ray (*arriba, izquierda*), Joseph B. Klemp
82	Joe Lertola
84	David Hessler
85	Thinking Machines Corp.
87	Michael Goodman
89-90	De *Computers*, *Pattern*, *Chaos*, *and Beauty*, por C. A. Pickover
93	Jean Loup Charmet
94	Documents PLS (*arriba*); Roger-Viollet (*abajo*)
95-96	Documents PLS



LA FOTOGRAFIA de la portada recoge parte de un sistema de más de 2000 fichas de dominó que se ordenaron para poner de manifiesto la subcriticalidad, la criticalidad y la supercriticalidad. En un sistema crítico, se produce una reacción en cadena con sólo tumbar una ficha; para que la catástrofe ocurra en un sistema subcrítico la sacudida del tablero deberá ser enérgica. El sistema hipercrítico se halla siempre expuesto a causar graves reacciones concatenadas (véase "Criticalidad auto-organizada", en este mismo número).

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal Garfella
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48 Telefax 419 47 82

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Alan Hall, *Executive Editor*; Michelle Press, *Managing Editor*; Timothy M. Beardsley; Elizabeth Corcoran; Deborah Erickson; Marguerite Holloway; John Horgan; Philip Morrison, *Book Editor*; Corey S. Powell; John Rennie; Philip E. Ross; Ricki L. Rusting; Russell Ruthen, Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam.
PUBLISHER John J. Moeling, Jr.
ADVERTISING DIRECTOR Robert F. Gregory
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Claus-Gerhard Firchow
CHAIRMAN OF THE BOARD Dr. Pierre Gerckens
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª
08029 Barcelona (España)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	6600	12.000
Extranjero	7300	13.400

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 600 pesetas
Extraordinario: 775 pesetas

- Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.
- En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen ei transporte aéreo.
- El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. 652 42 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48

PUBLICIDAD

Madrid: Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 409 70 45 - Fax 409 70 46

Cataluña: Marcel Klein
M. K. Publicidad
Ortigosa, 14-16, 3º, D. 20
08003 Barcelona
Tel. 268 45 05 - Fax 268 16 07



ISSN 0210-136X Dep. legal: B. 38.999-76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por T2, Llull, 145 - 08018 Barcelona
Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de la Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

... cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: "Los dos niños lobos de la India fueron vistos por primera vez, viviendo como lobos entre lobos, el día nueve de octubre de 1920, por el reverendo J. A. L. Singh, misionero anglicano. Este y su esposa confiaron en que dos o tres años de vida en común con niños normales recogidos en su orfanato transformarían aquellas pequeñas bestias en seres humanos. Grande fue el chasco. Verdaderos lobeznos, odiaban, temían y esquivaban a las personas. Kamala, la mayor de ambos, gradualmente fue convirtiéndose en un ser humano patético y subnormal, aunque evidentemente no idiota. Aprendió a pronunciar unas cincuenta palabras que, a veces, utilizaba para formar frases cortas. De todo ello resulta claro que, si bien un bebé nace con toda la potencialidad para alcanzar su pleno desarrollo humano, éste sólo se logra merced a la asociación con los de su especie desde los años más tempranos."

"Uno de los vehículos militares más extraños y versátiles ensayados hasta ahora es un tractor construido por la empresa Minneapolis-Moline Power Implement. Según *Ethyl News*, es capaz de arrastrar obuses de seis pulgadas por terrenos impracticables, atravesando lodazales y remansos de un metro de profundidad y abriéndose paso tronchando árboles de más de diez centímetros de diámetro. El 'remolcador militar de gran velocidad', su nombre auténtico, no tardó en recibir el apodo cuartelario de 'Jeep'."

"El mundo ha estado siempre bien informado acerca de los estragos causados por los insectos, puesto que las especies más dañinas de éstos, sean reptantes o aladas, no son fáciles de ignorar. Los hongos no les andan en zaga y, además, trabajan en silencio y no se ven. En los montes de Nueva Inglaterra, cubiertos hace cuarenta años de majestuosos castaños, no queda en pie ningún ejemplar adulto de los originales. Algún agente introdujo la roya que aniquiló bosques enteros de valiosos árboles maderables. Hasta la fecha, por otra parte, la enfermedad del olmo holandés está clasificada de irreversible. Portador del hongo es un escarabajo, que se oculta hasta el punto de hacer muy difícil el tratamiento con fungicidas."

"Cuando la electricidad se mueve, crea siempre un campo magnético en torno suyo. Por tanto, cada electrón de un átomo crea sus propios campos magnéticos; uno a causa de su movimiento orbital y otro a causa de su giro interno, o espín. El efecto orbital podemos dejarlo de lado, ya que los experimentos demuestran que poco o nada tiene que ver con el ferromagnetismo. Así pues, el electrón con espín es la partícula magnética primaria. Muchas veces, los espines de los electrones se combinan para no producir ningún efecto. Ello es así porque un electrón con espín dextrógiro contrarresta el efecto magnético de un electrón próximo que sea levígiro. Pero en los materiales ferromagnéticos, en vez de espines positivos y negativos que se contrarresten limpiamente, adivinamos que uno de los tipos predomina acusadamente sobre el otro. Y eso es lo que pasa."

... cien años

SCIENTIFIC AMERICAN: "Nikola Tesla ha trabajado con dinamos que llegan hasta las 25 000 alternancias por segundo y, por ello, tiene a su alcance unos fenómenos que únicamente se entrevén, puesto que los experimentos están confinados en las frecuencias comúnmente utilizadas. En el seno del medio que circunda la máquina existe una inmensa cantidad de energía y, realmente, podría decirse del experimentador que está trabajando dentro del dieléctrico de un condensador. Cuando las lámparas incandescentes cortocircuitadas por un pedacito de barra de cobre resplandecen con intensidad a cierta distancia de la bobina de inducción conectada a la máquina, y los tubos Geissler, desprovistos de terminales, presentan de golpe una brillante irradiación, el experimentador se despierta repentinamente de su sueño de la energía eléctrica, como algo transportado a lo largo de un hilo conductor, ante la aterradora sensación de que la energía contenida en el dieléctrico es lo único con lo que tiene que habérselas."

"Afirma J. L. Balbi: La profesión médica sabe perfectamente que todo esfuerzo mental provoca un aflujo de sangre en el cerebro, y que la cantidad de sangre depende de la intensidad del pensamiento; pero un aflujo sanguíneo supone un alza de temperatura y, si pudiéramos medirla, seríamos capaces de determinar, *grosso modo*, la 'potencia' necesaria para generar cualquier pensamiento o esfuerzo mental. Esta medición la efectúo como sigue: dispongo de una especie de casco hecho de un material ligero y muy conductor (del calor). En su centro fijo una pila termoeléctrica que conecto a un galvanómetro sensible. Merced a este ingenio, podría averiguarse la 'potencia mental' de niños y niñas, y también de hombres, y de ese modo señalar en qué dirección deben encaminarse sus esfuerzos mentales."

Mundos en torno a otras estrellas

Teoría y observación abonan la existencia de sistemas planetarios. La búsqueda astronómica se está centrando en planetas que podrían orbitar en torno a estrellas cercanas

David C. Black

¿Hay planetas como el nuestro que giran alrededor de otras estrellas? La respuesta guarda estrecha relación con la cuestión de la existencia de vida fuera de la Tierra. El lugar ideal para la aparición de la vida es la superficie de un planeta que opere a modo de "cápsula de petri cósmica" donde, una vez surgida, pueda nutrirse conforme evoluciona hacia estados más complejos. La búsqueda de otros sistemas planetarios constituirá, por tanto, una tarea importante en cualquier empeño por averiguar las posibilidades de vida extraterrestre. Además, los resultados de esa inquisición son esenciales para comprender el origen de la Tierra y del sistema solar.

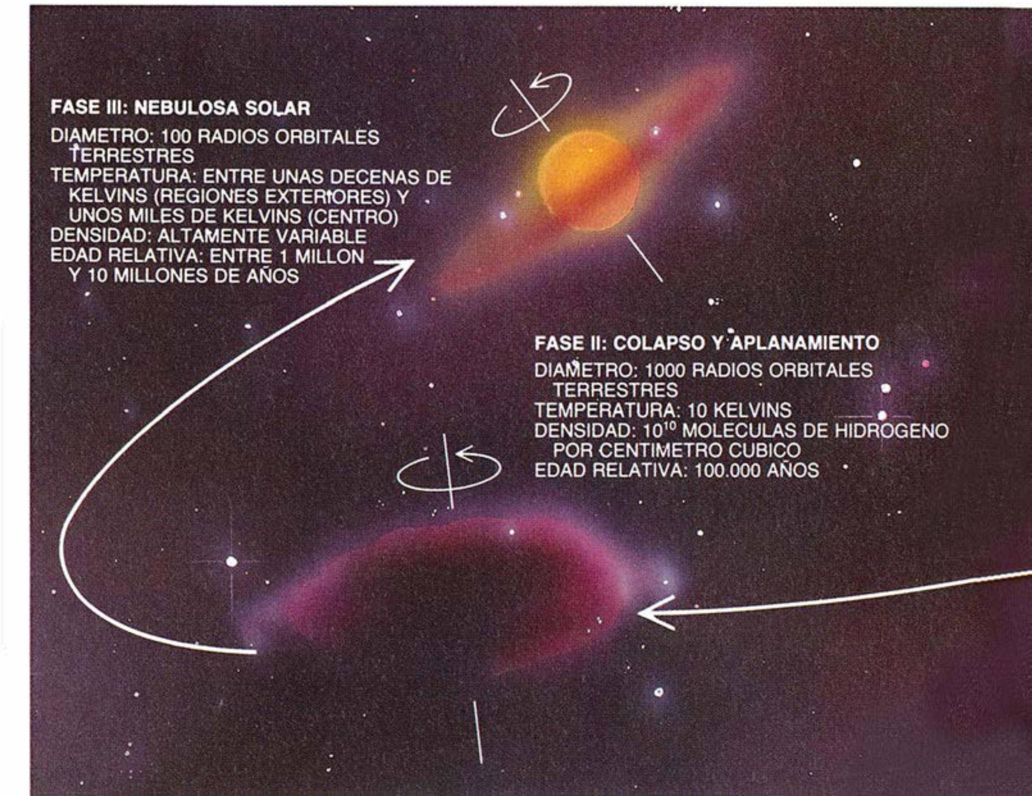
A lo largo de los años, los astrónomos han venido dibujando una imagen detallada del origen del Sol y de su comitiva de planetas. Los elementos característicos de esta imagen se basan, por completo, en características encontradas en un único sistema planetario, el nuestro. Por desgracia, no ha podido ser todavía de otra manera. El descubrimiento de indicios estadísticamente significativos que concernieran a la naturaleza de otros sistemas planetarios proporcionaría, sin duda, muchos datos desconocidos acerca del proceso que alumbró estrellas y planetas.

Las perspectivas de un hallazgo de ese alcance han aumentado notablemente. Algunos investigadores acaban de detectar compañeros planetarios que rodean a otras estrellas, si bien las observaciones no han traspasado todavía el umbral de la provisionalidad. La nueva generación de detectores y telescopios, unida a técnicas de detección innovadoras, mejorará la situación.

El punto de vista actual sobre el origen del sistema solar hunde sus raíces en nociones desarrolladas por Immanuel Kant y Pierre Simon de Laplace en las postrimerías del siglo XVIII. Propusieron una hipótesis nebular para el origen del sistema solar: el Sol y los planetas se condensaron a partir de una nube grande y grumosa. Con los años, la hipótesis nebular ha sufrido refinamientos y modificaciones, pero no hasta el punto de cambiar la idea central. Deja sentir su peso en el pensamiento actual acerca de cómo y dónde se formaron los planetas y orienta, por tanto, la búsqueda.

Importantes regularidades y variaciones en la estructura del sistema solar denuncian un origen nebular. Todos los planetas orbitan en el mismo plano aproximadamente: las órbitas de todos los planetas, excepto Mercurio y Plutón, están comprendidas dentro de tres grados de la eclíptica, el plano de la órbita de la Tierra. El plano orbital medio de los planetas queda también comprendido dentro de seis grados del plano ecuatorial del Sol. Estas propiedades sugieren que los planetas se formaron a partir de una estructura común, discoidal, llamada nebulosa solar.

DAVID C. BLACK es un investigador avezado en el estudio de la formación de estrellas y sistemas planetarios. Se doctoró en física por la Universidad de Minnesota. Trabajó para el Centro de Investigación Ames de la NASA de 1972 a 1988, año en que se convirtió en director del Instituto Lunar y Planetario de Houston. Conocedor de la composición de los gases nobles en los meteoritos, determinó que éstos contienen material que se originó allende el sistema solar.



Si colocamos nuestra atalaya sobre el polo Norte terrestre, observaremos que todos los planetas giran alrededor del Sol en sentido contrario a las agujas del reloj, idéntico sentido en que el astro gira en torno a su eje. Los planetas viajan también en órbitas casi circulares (Mercurio y Plutón tornan a ser leves excepciones). Tales movimientos regulares se ajustan a la idea de un disco ancestral que se hallaba dinámicamente ordenado (ni caótico ni irregular) y a la hipótesis de que los movimientos desarrollados en el interior del disco estaban dominados por la rotación en torno al Sol.

La composición planetaria varía, otro rasgo notable de nuestro sistema, según la distancia al Sol. Los planetas gaseosos exteriores (Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno) contienen principalmente elementos ligeros y volátiles. Lo que adquiere especial validez para el caso de Júpiter, cuya composición, dominada por hidrógeno y helio, se acerca a la solar. Los demás planetas exteriores, aunque poseen menos hidrógeno, son ricos en compuestos hidrogenados (el amoníaco, por ejemplo.)

Por el contrario, los planetas interiores, o terrestres (Mercurio, Venus, la Tierra y Marte), constan sobre todo de elementos más pesados, tales como silicio y hierro, mucho menos abundantes en el cosmos que el hidrógeno. Si se añadieran suficientes elementos ligeros a la Tierra para igualar su composición a la solar, su masa vendría a ser entonces la de Júpiter. Por lo que parece, los planetas exteriores poseen mayor masa porque pudieron mantener los elementos y compuestos más ligeros y volátiles de

EL NACIMIENTO DE LOS SISTEMAS ESTELARES

NUBE DE GAS Y POLVO
DIAMETRO: UNOS CENTENARES DE AÑOS LUZ
MASA: UNOS MILES DE MASAS SOLARES
DENSIDAD Y TEMPERATURA: ALTAMENTE VARIABLE

FRAGMENTO DE LA NUBE (NUCLEO DE LA NUBE MOLECULAR)
DIAMETRO: 30 AÑOS LUZ
TEMPERATURA: ENTRE 10 Y 50 KELVINS
DENSIDAD: 10^4 MOLECULAS DE HIDROGENO POR CENTIMETRO CUBICO
MASA: ALGUNAS MASAS SOLARES

FASE I: COLAPSO
DIAMETRO: ENTRE 1 Y 2 AÑOS LUZ (100.000 RADIOS ORBITALES TERRESTRES)
TEMPERATURA: 10 KELVINS
DENSIDAD: 10^5 MOLECULAS DE HIDROGENO POR CENTIMETRO CUBICO
EDAD RELATIVA: 0 AÑOS

la nebulosa solar en el proceso de formación de los planetas.

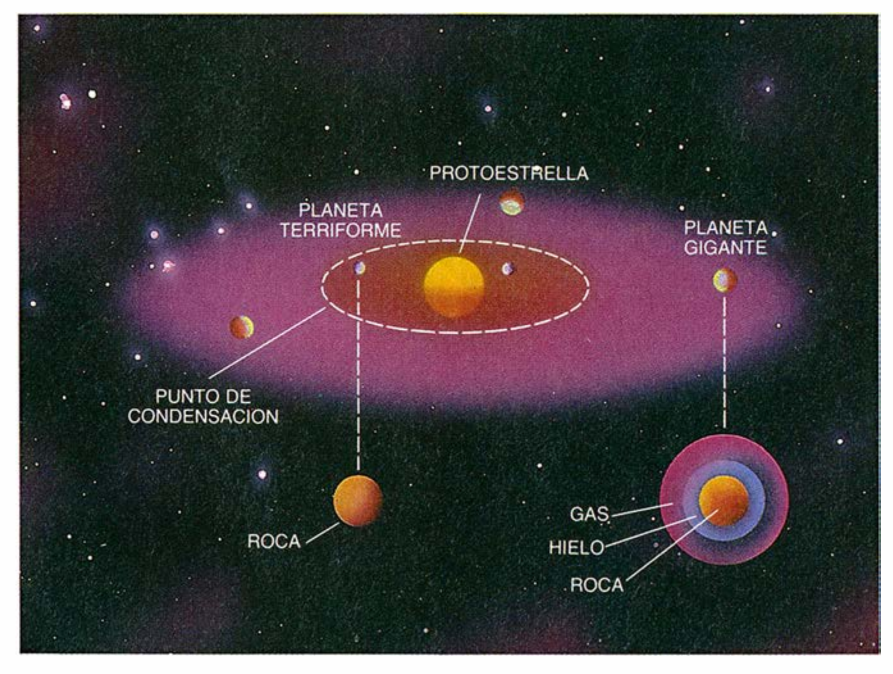
Diferencia que suele justificarse sosteniendo que la parte interior de la nebulosa solar poseía calor suficiente para que los elementos volátiles existieran sólo en forma gaseosa. Lo más probable es que las primeras etapas críticas de la formación de los planetas estuvieran controladas por la acumulación de materia sólida en objetos progresivamente mayores. El agua abunda en el cosmos y se condensa a una temperatura elevada, en comparación con las temperaturas nebulares medias; es muy probable, pues, que desempeñara una función importante en el nacimiento de los planetas. Las regiones de la nebulosa en las que la temperatura era de 170 kelvin o menos (el punto de condensación del hielo) debieron contener una reserva adecuada de materia sólida para que se formaran los planetas gigantes.

Cabría, pues, pensar que los planetas mayores siempre se forman en las regiones frías y exteriores de un disco que rodee a una estrella. Esta hipótesis permite acotar por dónde, en relación a la estrella central, deben los astrónomos buscar grandes planetas extrasolares.

Los discos circumestelares parecen constituir un producto natural del proceso de formación de las estrellas. Gestación que empieza con el colapso gravitacional de núcleos de materia densos y fríos en nubes de gases moleculares y de polvo. Cuando el núcleo se contrae, desaparecen los movimientos aleatorios; la rotación global del núcleo crea entonces un disco gaseoso y aplanado. A tenor de los datos que se poseen, esos discos serían muy rígidos, o disipativos, lo que provocaría que el momento angular se transfiriese hacia la parte exterior del disco y fluyera la masa hacia dentro, hacia la estrella naciente.

Los planetas se van amalgamando, coalescen, durante el breve intervalo que transcurre entre la formación del disco y su desaparición, lapso que abarca unos millones de años. La desaparición se debe a que se lo traga la estrella recién nacida o lo expulsa. Hay pruebas de que los planetas no se limitaron a colapsarse a partir de la nebulosa solar. Así, los ejes de rotación de los planetas no son, en general, perpendiculares a la eclíptica, lo que sugiere que esos objetos celestes aparecieron a través de un proceso complejo y caótico, en el que intervino la acreción de unidades menores. Infiérese de ello la existencia de una diferencia fundamental entre estrellas y planetas por lo que al modo de formación respecta, una distinción que deberá recordarse cuando se busquen sistemas planetarios.

Si la idea actual del nacimiento de las estrellas se ajusta en grandes líneas a la realidad, deberán hallarse discos asociados a muchas estrellas jóvenes. Algunos de estos discos podrían recorrer entonces etapas evolutivas parecidas a las que hemos inferido para el joven sistema solar. La baja temperatura y la naturaleza difusa, a menudo muy oscurecida, de los discos que rodean las estrellas en formación dificultan su estudio óptico, razón por la cual los astrónomos se han concentrado en las observaciones realizadas en frecuencias de radio o infrarrojas. Esas largas longitudes de onda de la radiación electromagnética atraviesan las nubes espesas de polvo mucho mejor que la luz visible.



1. SE PRESUME QUE LOS PLANETAS GIGANTES se formarían en partes frías y alejadas de la nebulosa solar, donde el agua se condensara en hielo y ofrecieran material abundante para el crecimiento planetario. Los planetas de regiones más calientes y próximas a la estrella se irían acumulando a partir de silicio y hierro; acabarían constituyendo cuerpos rocosos, como la Tierra.

La primera prueba convincente de la presencia de estructuras discoidales en torno a estrellas jóvenes vino con el descubrimiento de que estos objetos son fuentes de chorros energéticos, o ráfagas, de gas y polvo. Lo que se despide constituye, presumiblemente, material eyectado por un disco que gira, aunque sólo suministra una prueba circunstancial de los discos que ciñen a las estrellas en formación.

Ciertos estudios más recientes y directos han corroborado esa prueba. Cuando las partículas de polvo absorben luz de una estrella, se calientan y vuelven a radiar la luz en forma de radiación infrarroja menos energética. La longitud de onda de los rayos infrarrojos depende del tamaño de las partículas. Determinados objetos estelares jóvenes (sobre todo HL Tauri, R Monoceros y L1551/IRS 5) emiten cantidades anormalmente grandes de radiación infrarroja, indicio de partículas de polvo. Las observaciones en el infrarrojo de tales objetos, desde telescopios terrestres y desde el *Satélite de Astronomía Infrarroja* (*IRAS*) de la NASA, señalan que las partículas en cuestión tienen un diámetro comprendido entre una y unas decenas de micras. Aunque puedan parecer pequeñas, son bastante mayores que las que existen en las nubes interestelares, lo que hace sospechar que el proceso de formación de los planetas pudo haber empezado en torno a esas estrellas. Algunos investigadores mantienen que el polvo está producido por colisiones entre cuerpos de estructura cometaria, precursores quizá de los planetas, que dan vueltas alrededor de esas estrellas.

La interferometría de punto, técnica de observación muy potente, evita la difuminación de la atmósfera terrestre mediante el recurso a exposiciones muy cortas, con las que se reconstruye matemáticamente la imagen sin distorsionar. Ni siquiera esa técnica puede ofrecer una imagen clara de las nubes de polvo que rodean

las estrellas jóvenes, aunque permite que los astrónomos determinen que la forma y el tamaño de las nubes concuerdan con los que cabe esperar en un disco. Las imágenes del *IRAS* confirman que muchas estrellas, viejas algunas como Vega y Beta Pictoris, están rodeadas por estructuras discoidales de polvo. Las observaciones de las emisiones de radioondas denuncian la presencia de gas en los discos, de monóxido de carbono en particular, que emite sobre todo en longitudes de radioondas de unos milímetros.

Las observaciones en el infrarrojo de las jóvenes estrellas T Tauri proporcionan muestras adicionales de discos en condensación en torno a otras estrellas. A medida que envejecen, estas estrellas radian menos a longitudes de onda infrarrojas cortas, como si las partículas más calientes, las más próximas al objeto, fueran capturadas o convertidas en vapor.

SEÑALES DE PLANETAS EN TORNO A ESTRELLAS

MASA ESTELAR (SOL = 1)	DISTANCIA ORBITAL (U.A.)	TEMPERATURA (KELVIN)	PERIODO ORBITAL (AÑOS)	PERTURBACION ANGULAR (μ seg. DE ARCO)	PERTURBACION DE VELOCIDAD (m/s)
PERIODOS ORBITALES IGUALES					
3	7.6	293	12	76	0.17
1	5.2	135	12	157	0.39
0.3	3.5	57	12	351	0.88
RESTRINGIDOS POR LA TEMPERATURA					
3	22.6	170	61.6	226	0.1
1	3.3	170	6.0	99	0.5
0.3	0.4	170	0.5	40	2.6

En el esfuerzo de búsqueda de sistemas planetarios se emplean métodos directos e indirectos. Los primeros involucran la detección de luz reflejada, o de radiación infrarroja, por los propios planetas. Pero hay un inconveniente serio: la emisión que dimana de un planeta tiende a quedar ahogada por la emisión mucho más brillante de la estrella materna próxima.

Los métodos indirectos analizan las estrellas rastreando señales de que respondan a los tirones gravitacionales de un planeta orbitante. Cuando el planeta se mueve de un lado a otro de la estrella, tira de ésta hacia delante y hacia atrás. Este tirón se manifiesta, a su vez, en un ligero balanceo superpuesto al movimiento global de la estrella por el cielo. También puede detectarse en forma de un ligero cambio periódico en la velocidad de la estrella respecto a la Tierra.

Cualquier movimiento de aproximación hacia la Tierra o de alejamiento de ella provoca que la luz de la estrella se comprima o se estire ligeramente. Cuando la luz se comprime, se torna algo más azul y, cuando se estira, se enrojece un tanto; a ese fenómeno se le denomina efecto Doppler. La medición cuidadosa de las líneas de absorción del espectro de una estrella puede, en principio, revelarnos cualquier cambio periódico en su movimiento.

Se allana el camino de la búsqueda indirecta con algunas hipótesis simplificadoras. Muchos investigadores han aventurado que los planetas gigantes en torno a otras estrellas poseerían períodos orbitales parecidos al de Júpiter; de una década aproximada, pues. La fijación del período orbital permite determinar la magnitud de la órbita en función de la masa de la estrella y calcular así una perturbación angular, o de velocidad, esperada (dada la distancia de la estrella y atribuyendo cierta masa al planeta).

Cabe una posibilidad alternativa, en mi opinión más lógica: los planetas gigantes se formarían en el radio de lejanía de la estrella en que la temperatura reinante fuera la del punto de condensación del agua, si no inferior. En este caso, la luminosidad de la estrella determina el tamaño de la órbita de los planetas gigantes. Se puede continuar como antes para establecer hasta qué punto el planeta afectará a la velocidad y la trayectoria aparente de la estrella.

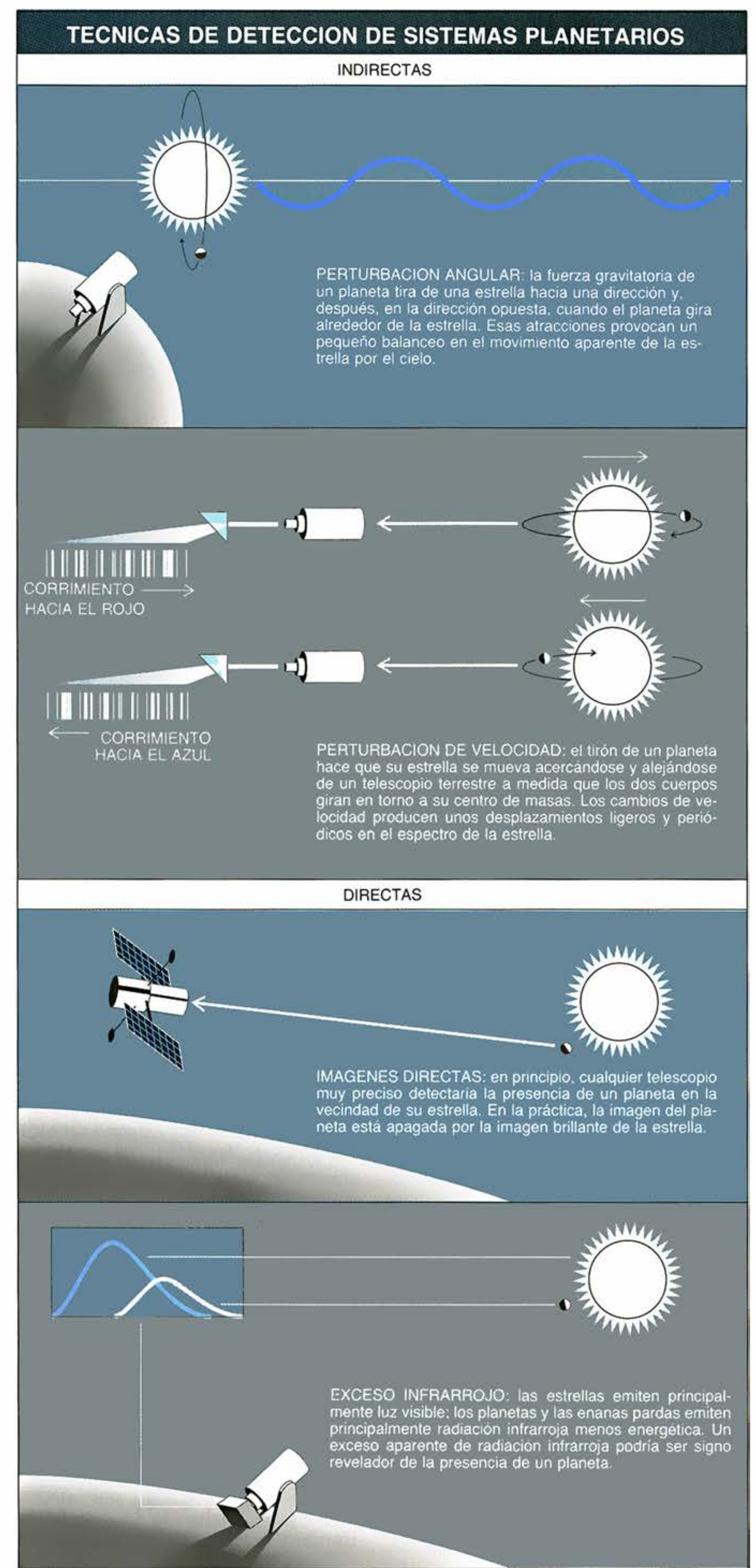
El tamaño de la perturbación angular, o balanceo, crece con la distancia entre el planeta y la estrella; disminuye al aumentar la masa estelar. Si los sistemas planetarios se forman de tal manera que los planetas gigantes tiendan siempre a mostrar períodos orbitales más o menos similares, las estrellas débiles de poca masa serán las más perturbadas, pues los planetas gigantes orbitarán lejos de estas estrellas en relación con la masa de la estrella. Ahora bien, si los planetas gigantes se forman a una distancia donde las temperaturas están por debajo del punto de condensación del agua, sucederá lo contrario, ya que los planetas gigantes orbitarían lejos de las estrellas masivas y brillantes en relación con la masa de la estrella. (En uno y otro caso, las estrellas de menor masa experimentan la máxima perturbación de la velocidad.)

Si la temperatura constituye el factor determinante, cabe entonces la posibilidad de que los períodos orbitales típicos de los planetas gigantes sean mucho más cortos que los que se suelen esperar. La estrella media es más fría y mucho menos luminosa que el Sol, de manera que los planetas gigantes podrían viajar en órbitas cercanas, mucho más rápidas. Para una estrella cercana típica, de unas 0,3 masas solares, el período orbital de un planeta gigante no llegaría al año, lo que contrasta con el período orbital de Júpiter, que abarca unos 12 años.

El recurso a hipótesis simplificadoras no evita que la detección de otros sistemas planetarios siga siendo una tarea extremadamente difícil. Los telescopios e instrumentos actuales funcionan en el límite de su capacidad cuando buscan acompañantes estelares que tengan masas comparables con la de Júpiter, o menores. Por todo ello resulta ineludible que la historia de las búsquedas planetarias esté plagada de pistas falsas y de descubrimientos fantasmas.

La estrella más conocida de cuantas se analizan en la inquisición de otros sistemas planetarios es, a buen seguro, la estrella de Barnard. Este objeto débil, frío y de poca masa (tipo M), lleva el nombre del astrónomo americano E. E. Barnard, quien observó sus insólitos atributos en 1916. La estrella de Barnard tiene el máximo movimiento aparente celeste que se conoce. Sigue en vecindad al sistema estelar triple Centauri, el segundo estelar más próximo, puesto que se halla a sólo seis años luz.

Peter van de Kamp, que trabajaba en el Observatorio Sproul, se dio cuenta en 1937 de que esas dos propiedades convertían a la estrella de Barnard en ideal para la búsqueda indirecta, pues su balanceo, caso de ocurrir, destacaría y se mostraría con nitidez. Van de Kamp, que analizó datos posicionales de la estrella de Barnard desde 1916, empezó a reco-



ger su propia documentación con el telescopio de Sproul.

Así llegamos a la década de los sesenta, cuando van de Kamp sacó la conclusión de que la estrella de Barnard tenía dos acompañantes con la masa de Júpiter, uno que describía la órbita en 12 años y el otro en 24. Pero los estudios independientes de George D. Gatewood, del Observatorio Allegheny en Pittsburgh, y Robert S. Harrington, del Observatorio Naval de EE.UU., a lo largo de la última década, resuelven que el movimiento de la estrella de Barnard no se compadece con la existencia de los planetas de van de Kamp. Más: las observaciones de ambos investigadores excluyen la posibilidad de que la estrella de Barnard posea ningún acompañante de masa muy superior a la de Júpiter, aunque podría contar con acompañantes de menor masa.

Otro objeto estelar que mereció amplia atención fue VB8-b, acompañante de la estrella próxima Van Biesbroek 8. Fue descubierto, de manera independiente, en 1984, por Harrington y por Donald McCarthy y sus colaboradores de la Universidad de Arizona. Este rastreo parecía ser especialmente sólido, ya que se utilizaron dos técnicas distintas para encontrar el objeto: Harrington recurrió a observaciones astrométricas para deducir una variación en el movimiento de VB8-b y McCarthy observó, mediante técnicas de espectrometría infrarroja de punto, lo que semejaba un objeto débil cercano.

Tras un prolongado debate, se avino en considerar VB8-b un objeto de clase intermedia, cuya masa era la veinteava parte de la solar, unas 50 veces la de Júpiter. Pero esa enana parda –así se llaman los objetos de sus características– sería demasiado pequeña para desencadenar las reacciones nucleares que producen la energía de las estrellas; resultaría, pues, casi imposible distinguirla a longitudes de onda visibles. Escasos años después del descubrimiento de VB8-b, varios grupos acometieron observaciones más precisas; había que confirmar sus propiedades y caracterizarlas mejor. Mas, a pesar del esfuerzo empeñado, no encontraron trazas del objeto. Hoy los astrónomos prefieren pensar que VB8-b no existe, o por lo menos no existe en la forma en que lo describían las primeras observaciones.

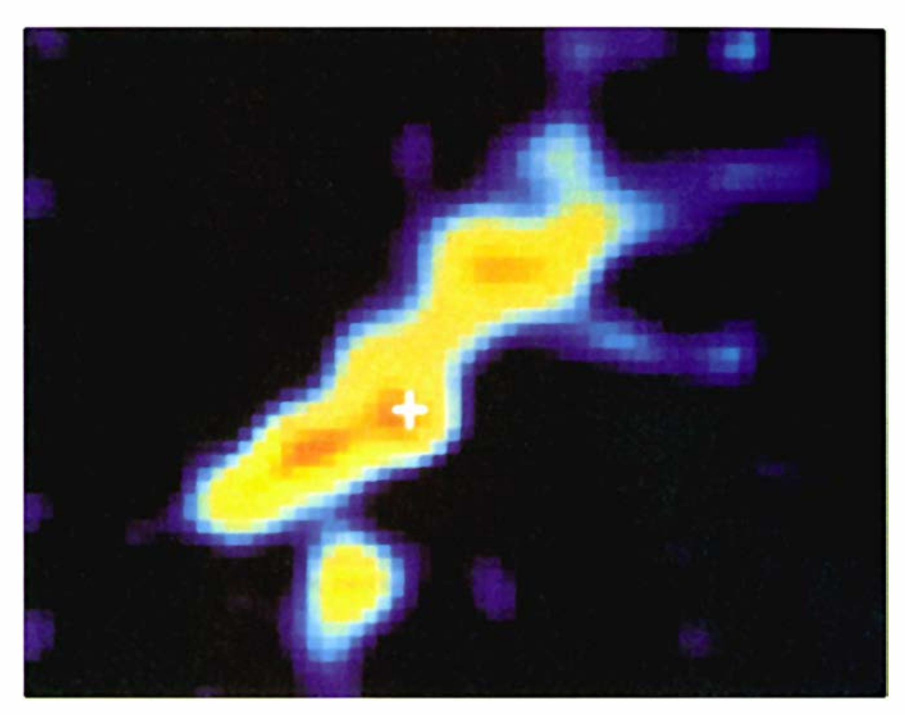
Bruce T. E. Campbell, de la Universidad de Victoria, junto con sus colaboradores, ha desarrollado recientemente una técnica de finísima precisión para detectar pequeñas perturbaciones en la velocidad. Consiste

en comparar el espectro de las estrellas con un espectro de referencia, de muy alta resolución, de un componente raro y bastante desagradable, el fluoruro de hidrógeno. En principio, el instrumento de Campbell detecta corrimientos Doppler mucho menores y, por tanto, perturbaciones de la velocidad mucho más ligeras que las que podían detectarse con anterioridad.

Con sus colegas del telescopio de Canadá-Francia-Hawai instalado en Mauna Kea, Campbell ha medido las velocidades radiales de 15 estrellas seis veces al año, con una precisión nominal de unos 10 metros por segundo. (Merece destacarse semejante precisión porque las corrientes convectivas de las superficies de las estrellas de tipo solar se mueven en un orden de los 1000 metros por segundo.) El grupo de Campbell no se ha atrevido a anunciar claramente el descubrimiento de otro sistema planetario, pero sí hablan de señales de aceleraciones perdurables —un posible indicador de presencia planetaria— en casi la mitad de las estrellas estudiadas.

El más intrigante de los objetos estudiados por el grupo de Campbell es la estrella Gamma Cephei, subgigante vieja y anaranjada (clase III-IV, tipo espectral K1) cuya masa se estima ligeramente mayor que la del Sol. Las medidas espectrales recogidas desde 1981 llevaron a Campbell a concluir que Gamma Cephei experimenta una variación cíclica de velocidad de una amplitud de 25 metros por segundo y un período de 2,6 años. Este período, combinado con la masa supuesta de la estrella, implica que el acompañante orbita a unos 300 millones de kilómetros de Gamma Cephei, el doble de la distancia de la Tierra al Sol. Para producir la perturbación de velocidad observada, el acompañante ha de tener una masa de 1,5 veces la masa de Júpiter, por lo menos.

Sería sorprendente observar un planeta gigante que orbitara tan cerca de una estrella relativamente luminosa, pero las sorpresas vienen de la mano de la investigación científica. Un aspecto más preocupante del hallazgo de Campbell es que datos recientes y precisos del estudio de Gamma Cephei muestran desviaciones significativas respecto de los movimientos que se esperarían cuando el hipotético planeta girara alrededor de su estrella. Hasta que Gamma Cephei no se haya observado durante varias "órbitas" de 2,6 años, los datos no adquirirán valor de prueba convincente. De cualquier modo, este trabajo y otros de similar sensibilidad y precisión que el grupo de Robert S. McMillan está realizando en la Universidad de Arizona son muy esperanzadores.



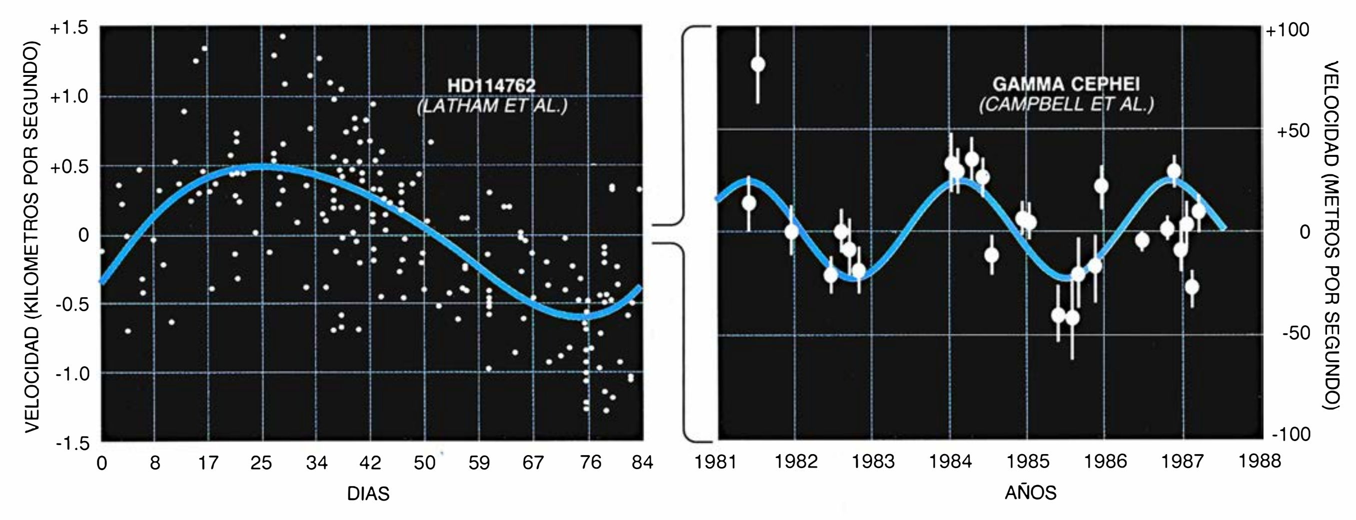
2. **DISCO APLANADO de gas y polvo, cuya órbita gira en torno a la joven estrella HL Tauri (identificada por la cruz blanca), en un mapa de falso color de emisiones de radioondas procedentes de las moléculas de monóxido de carbono. El disco tiene unas 30 veces el diámetro de la órbita de Plutón. Discos parecidos rodean otras estrellas jóvenes; son el lugar probable del nacimiento de planetas.**

David Latham y sus colaboradores del Centro de Astrofísica Smithsoniano de Harvard, sirviéndose de técnicas de medida de velocidades menos precisas aunque más convencionales, han recogido alguna de las pruebas más sólidas de la existencia de un acompañante subestelar. Observaron la estrella de tipo solar HD114762 durante más de 12 años y descubrieron que sufría variaciones periódicas de velocidad. En este caso, las mediciones realizadas en observatorios europeos han confirmado los datos.

Latham y sus colaboradores hallan una variación constante de velocidad que tiene un período de unos 84 días y una amplitud de unos 550 metros por segundo. Suponiendo que la estrella tenga la masa del Sol (posibilidad coherente con su temperatura y luminosidad), el período observado implicaría que el acompañante orbita a una distancia media de unos 60 millones de kilómetros, el intervalo que media entre Mercurio y el Sol. El límite inferior a la masa del acompañante es 11 veces la de Júpiter. Observaciones recientes y más precisas del equipo de W. D. Cochran en la Universidad de Texas en Austin confirman el período y señalan que la órbita es excéntrica. De su trabajo se desprende también una masa del acompañante bastante mayor que lo estimado en un comienzo.

Aunque muchos investigadores tienden a considerar dicho acompañante un verdadero planeta extrasolar, yo tengo mis dudas. Posee una masa muy superior a la de cualquier planeta del sistema solar. Quizá no represente un planeta, sino el extremo inferior de la población de objetos estelares, constituyendo HD114762 un tipo extremo de estrella binaria verosímilmente. Por más que desconozcamos el proceso de formación de las estrellas binarias, no parece que dependa de que los objetos posean un tamaño suficiente para encender las reacciones de fusión en sus núcleos. Nada impide que la naturaleza produzca sistemas binarios en que un miembro sea una estrella y el otro una enana parda (o marrón).

Los objetos cuya masa decuplica o multiplica por 20 la de Júpiter dan en constituirse seguramente como las estrellas, no como los planetas; es decir, se condensan directamente a partir de una nube de gas y no proceden del disco que rodea a la estrella. En mi opinión, los distintos modos de formación se manifiestan en el hecho siguiente: los sistemas planetarios (por lo menos el conocido) contienen una multitud de cuerpos, mientras que las estrellas son



3. OBSERVACIONES ESPECTROSCOPICAS de la estrella HD114762 (*izquierda*). Nos muestran la señal gravitatoria de un acompañante subestelar, una enana parda seguramente. Aunque las observaciones podrían tomarse como prueba de la presencia de un planeta de la masa de Júpiter orbitando en torno a la estrella Gamma Cephei *(ilustración de la derecha)* no parece que proceda sacar esa conclusión. (Recreación de A. Christie.)

predominantemente sistemas dobles o triples. La razón de la separación entre planetas y enanas pardas, aunque misteriosa, parece ser real. Esta información conduce a un principio importante para la búsqueda de sistemas planetarios: el objeto de ese empeño será el de descubrir sistemas planetarios, no enanas pardas. Los sistemas compuestos de una estrella y un solo acompañante subestelar no constituyen sistemas planetarios.

Ello no obstante, la investigación de las enanas pardas (también llamadas enanas marrones) podría aclarar el proceso de formación de estrellas y planetas. La indagación directa carece, por lo común, de precisión para detectar planetas del tamaño de Júpiter, o menores, en torno a otras estrellas; sí puede, en cambio, proporcionar información significativa acerca de acompañantes subestelares mayores. El grueso de esta búsqueda se realiza en la parte infrarroja del espectro.

Ciertos estudios que utilizan nuevos y refinados sistemas de detección en el infrarrojo han puesto de manifiesto la existencia de acompañantes fríos y débiles en torno a un reducido número de estrellas. Ben Zuckerman y Eric E. Becklin, de la Universidad de California en Los Angeles, entre otros, han detectado acompañantes enanos mientras investigaban una excesiva radiación infrarroja que no podía atribuirse a la emisión normal de una estrella. Todos los objetos encontrados hasta ahora entran en el perfil de las enanas pardas con una masa que decuplica varias veces la de Júpiter. A pesar de todo, la observación de enanas marrones sigue siendo muy incierta.

El grupo de McCarthy en Arizona y el de Geoffrey Marcy, de la Universidad estatal de San Francisco, entre otros, trabajan en la compilación de datos sobre la concentración de enanas pardas. El grupo de Arizona ha analizado 27 estrellas enanas rojas cercanas de tipo M. Para buscar acompañantes cuya tenue debilidad se resiste a la detección en longitudes de onda visibles, se recurre a la espectrometría de punto en longitudes de onda del infrarrojo de 1,6 y 2,2 micras (bandas H y K).

El número de estrellas en el análisis infrarrojo crece prestamente al aumentar su debilidad (las magnitudes mayores indican estrellas más débiles) hasta una magnitud de la banda K de aproximadamente 10,0; en ese punto los números caen de forma repentina. El grupo de Arizona no encuentra objetos con magnitudes de la banda K comprendidas entre +10,0 y +11,5. Un brillo de +11,5 (el límite del análisis) corresponde a la luminosidad infrarroja esperada de una enana parda cuya masa sea de 70 a 80 veces la de Júpiter y posea una edad de varios miles de millones de años, tal como se vería desde una distancia de cinco parsecs (16 años luz). La ausencia clara de tales objetos niega cualquier presunta continuidad de objetos en el intervalo de las estrellas a los planetas.

Esta acotación acaba de ser confirmada por Marcy y K. Benitz, alumno éste de la estatal de San Francisco; han analizado 70 estrellas de masa pequeña mediante técnicas de velocidad radial de una precisión de 230 metros por segundo. Las mediciones debían haber sacado a la luz cualquier acompañante subestelar cuya masa fuera incluso de sólo siete veces la de Júpiter, siempre que los períodos orbitales de los acompañantes no llegaran a los cuatro años. El análisis descubrió seis acompañantes estelares hasta ahora desconocidos de las estrellas estudiadas, pero no percibió presencia alguna de acompañantes subestelares. El análisis de la velocidad radial, combinado con resultados de prolongados estudios astrométricos de posiciones estelares, indica que no llegan al 2 por ciento las estrellas que disfrutan de acompañantes subestelares de masa superior a diez veces la masa de Júpiter.

En algunos casos, la falta de un descubrimiento puede constituir, en sí mismo, un descubrimiento importante. Desde hace tiempo vengo creyendo que de eso se trata a propósito de los acompañantes subestelares. Por regla general, las estrellas ligeras abundan más que las dotadas de gran masa. Descendiendo en la extrapolación, los teóricos esperaban que las enanas marrones se hallaran dispersas con profusión por toda la galaxia, como el polvo. Con la escasez de acompañantes subestelares, la naturaleza nos está indicando que ha llegado la hora de repensar parte de la física asociada con la formación de estrellas menguadísimas de masa.

Es obvio que las instalaciones actuales no sirven para emprender una búsqueda global de otros sistemas planetarios. Las minuciosas observaciones que demanda este proyecto para alcanzar un nivel científico debe realizarlas un nuevo conjunto de instrumentos avanzados. En general, deberían emprenderse búsquedas es-

pecíficas con suficiente precisión y sensibilidad, que, de obtener un resultado nulo, permitiera avanzar con firmeza nuestro conocimiento de la formación de los sistemas planetarios. Principio que debería facilitar la erección de las instalaciones adecuadas para buscar otros sistemas planetarios. Muchos proyectos prometedores han surgido ya; algunos a realizar en el suelo; otros, en el espacio.

Las mediciones de velocidad radial (perturbaciones de velocidad) suelen mostrarse impermeables a la difuminación provocada por la turbulenta atmósfera terrestre. La instalación de telescopios mayores y especializados permitiría, pues, un análisis cuidadoso de decenas o centenares de estrellas para detectar la presencia de acompañantes planetarios. Los telescopios que operan ya en la Universidad de Arizona y en la de Texas podrían servir de prototipos de la próxima generación de sistemas de velocidad radial.

Otra clase de sistemas terrestres se apoyaría en telescopios de muy grande abertura (de siete a diez metros); incorporarían óptica activa, capaz de manipular físicamente el espejo para compensar la distorsión atmosférica. Estos instrumentos, que se utilizarían para buscar directamente otros sistemas planetarios a longitudes de onda del infrarrojo, podrían darle la vuelta a las ideas que nos hemos forjado sobre la estructura y la evolución de los discos que rodean las estrellas jóvenes.

La mayoría de las técnicas de indagación planetaria funcionarían mejor en el espacio. El *Telescopio Infrarojo Espacial* de la NASA, cuyo lanzamiento está previsto para finales de la presente década, ofrecerá registros en el infrarrojo relativos a los discos que ciñen a las estrellas y de los sistemas planetarios recién nacidos, mejorando mucho las imágenes del *IRAS* de 1983.

La astrometría —medición ultraprecisa de la posición estelar— ganará mucho si se realiza en el espacio. Se pretende medir las deflexiones angulares de las estrellas con una precisión de diez millonésimas de segundo de arco: ¡el tamaño angular de una peseta en la Luna vista desde la Tierra! Tal precisión facilitaría la detección de acompañantes de sólo 10 masas terrestres que girasen alrededor de cualquier estrella situada a menos de 10 parsecs (30 años luz) del Sol.

Con la creación de telescopios con espejos y máscaras fijados con precisión, que evitaran la luz brillante de una estrella central, se podrían captar imágenes directas de luz visible de los planetas que giran en torno a otras estrellas. Sería muy deseable que se pudiera, a la vez, hacer astrometría y obtener imágenes mediante un solo telescopio. Está ya en fase de estudio la viabilidad de construir tal instrumento combinado en el Laboratorio de Propulsión a Chorro de Pasadena.

La próxima generación de instrumentos para la búsqueda planetaria abarcará interferómetros ópticos y redes de telescopios muy alejados entre sí que combinen sus imágenes para así crear un macrotelescopio único. Tales dispositivos ofrecerían un poder de resolución miles de veces superior al de los instrumentos existentes. La Luna sería el lugar ideal de instalación de un interferómetro óptico y muchos otros instrumentos astronómicos. Cabe imaginar que la cara obscura de la Luna se convierta en sede de una batería de instrumentos científicos que buscarán no sólo otros sistemas planetarios, sino también señales de vida inteligente en el universo.

Durante siglos se ha venido especulando sobre la posible existencia de mundos distintos del nuestro. Desde hace más de cincuenta años se viene indagando en nuevos sistemas planetarios, cuyo descubrimiento han tenido los astrónomos en la punta de los dedos. La renovación del interés en este campo, sumada al desarrollo de instrumentos más precisos, asegura para las próximas décadas momentos de especial excitación. La primera confirmación de un sistema planetario distinto del nuestro marcará una época, completando la revolución del pensamiento que empezó con Nicolás Copérnico hace unos 450 años.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

IN SEARCH OF OTHER PLANETARY SYSTEMS. David C. Black en *Space Science Reviews*, vol. 25, n.º 1, págs. 35-81; enero de 1980.

PROTOSTARS AND PLANETS II. Dirigido por David C. Black y Mildred Shapley Matthews. University of Arizona Press, 1985.

LIFE IN THE UNIVERSE. Donald L. DeVincenzi en *Planetary Report*, vol. 7, n.º 6, pág. 3; noviembre/diciembre de 1987.

CIRCUMSTELLAR MATERIAL ASSOCIATED WITH SOLAR-TYPE PRE-MAIN-SEQUENCE STARS: A POSSIBLE CONSTRAINT ON THE TIMESCALE FOR PLANET BUILDING. K. M. Strom, S. E. Strom, S. Edwards, S. Cabrit y M. F. Skrutskie en *Astronomical Journal*, vol. 97, n.º 5, págs. 1451-1470; 1989.

A PROFUSION OF PLANETS. David C. Black y Eugene H. Levy en *The Sciences*, págs. 30-35; mayo/junio de 1989.

Criticalidad auto-organizada

Los macrosistemas interactivos evolucionan hacia un estado crítico, en el que un acontecimiento banal provoca una catástrofe. La criticalidad auto-organizada explica la dinámica de terremotos, mercados y ecosistemas

Per Bak y Kan Chen

Es típico que, al producirse una catástrofe, los analistas la atribuyan a una rara conjunción de circunstancias o a cierta combinación de poderosos mecanismos. Cuando San Francisco sufrió la conmoción de un tremendo seísmo, los geólogos ubicaron el origen del cataclismo en una inmensa zona inestable, coincidente con la falla de San Andrés. Cuando el mercado de valores se vino abajo el Lunes Negro de 1987, los economistas pusieron su dedo acusador en el efecto desestabilizador de la informatización y automatización de las transacciones. Cuando los registros fósiles revelaron la extinción en masa de los dinosaurios, los paleontólogos la atribuyeron al impacto de un meteorito o a la erupción de un volcán. Es posible que estas teorías sean correctas. Pero sistemas tan grandes y complicados como la corteza terrestre, el mercado de valores y el ecosistema no sólo pueden romperse bajo los efectos de un golpe titánico, sino también por la caída de un alfiler. Los grandes sistemas interactivos se organizan perpetuamente a sí mismos, hasta llegar a un estado crítico, en el que un acontecimiento banal da inicio a una reacción en cadena capaz de producir la catástrofe.

Tradicionalmente, los investigadores han analizado los grandes sistemas interactivos de igual forma que los sistemas pequeños y ordenados, debido, sobre todo, al éxito de los métodos desarrollados para sistemas reducidos. Creían poder predecir el comportamiento de un gran sistema interactivo a través del estudio por separado de sus elementos y del análisis individualizado de sus mecanismos microscópicos. A falta de una teoría mejor, dieron por hecho que la respuesta de un sistema interactivo grande sería proporcional a la perturbación. Estaban convencidos de que la dinámica de los sistemas interactivos de gran tamaño podría describirse en función de un estado de equilibrio, perturbado de vez en cuando por una fuerza exterior.

Sin embargo, ha ido resultando cada vez más obvio que muchos sistemas complicados y caóticos son refractarios al análisis tradicional. En 1987, uno de los autores (Bak), en colaboración con Kurt A. Wiesenfeld, desarrolló una noción concebida para explicar el comportamiento de los sistemas compuestos, sistemas que contienen millones y millones de elementos que interactúan a pequeña escala. Propusimos la teoría de criticalidad auto-organizada: muchos sistemas compuestos evolucionan espontáneamente hacia un estado crítico, en el que un acontecimiento banal da inicio a una reacción en cadena capaz de afectar a un número cualquiera de elementos del sistema. Aunque los sistemas compuestos producen muchos más acontecimientos banales que catástrofes, una parte integral de su dinámica está constituida por reacciones en cadena de todos los tamaños. Según la teoría, el mecanismo que conduce a sucesos de poca entidad es el mismo que el desencadenante de grandes acontecimientos. Además, los sistemas compuestos jamás alcanzan el equilibrio; por el contrario, evolucionan de un estado metaestable al siguiente.

La criticalidad auto-organizada constituye una teoría holística: las características globales, como el número relativo de sucesos grandes y pequeños, no dependen de los mecanismos microscópicos. Resulta imposible, pues, comprender las características globales del sistema analizando por separado las partes que lo componen. Que nosotros sepamos, la criticalidad auto-organizada constituye el único modelo o descripción matemática que ha dado pie a una teoría holística para los sistemas dinámicos.

A lo largo de los cuatro últimos años, tanto los experimentos como los modelos teóricos han puesto de manifiesto que muchos sistemas compuestos que ocupan el corazón mismo de la geología, la economía, la biología o la meteorología, dan señales de criticalidad auto-organizada. Este enfoque ha mejorado nuestra comprensión del comportamiento de la corteza terrestre, los mercados de valores y los ecosistemas.

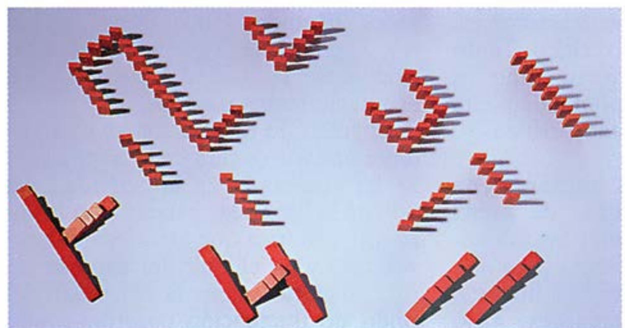
Dado que los sistemas compuestos contienen numerosos ingredientes y están gobernados por multitud de interacciones, los analistas no pueden construir modelos matemáticos que sean a la vez totalmente realistas y teoréticamente manejables. En consecuencia, han de recurrir a modelos simplistas e idealizados que reflejen las características esenciales de los sistemas reales. Si estos modelos simples demuestran solidez con respecto a diversas modificaciones, podrían servir para extrapolar a situaciones reales los hallazgos efectuados con ellos. (Esta aproximación ha tenido mucho éxito en la mecánica estadística del equilibrio, donde resulta posible la comprensión de fenómenos universales en sistemas con muchos grados de libertad a partir del estudio de modelos sencillos.)

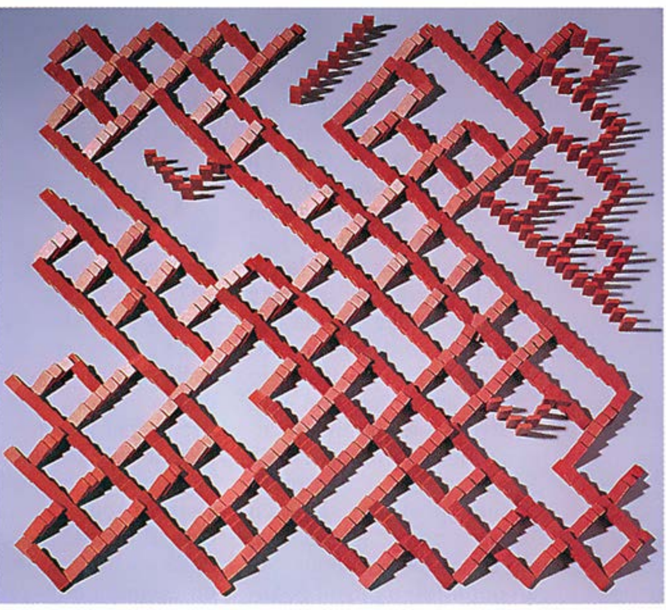
Un sistema engañosamente simple

PER BAK y KAN CHEN han estudiado conjuntamente la criticalidad auto-organizada desde 1988. Bak investiga en el Laboratorio Nacional de Brookhaven. Se recibió de doctor en física, en 1974, por la Universidad Tecnológica de Dinamarca. Perseveró en su interés por la física estadística, los sistemas dinámicos (caos), los conductores subdimensionales y los cuasicristales mientras trabajaba para NORDITA, el Centro de Investigación Thomas J. Watson, de IBM, y la Universidad de Copenhague. Pertenece a la Academia Danesa de Ciencias. Chen se graduó, en 1983, por la Universidad de Ciencia y Tecnología de China, doctorándose en física, en 1988, por la Universidad estatal de Ohio. En Brookhaven ha estudiado la criticalidad auto-organizada y los procesos de optimización dinámica.

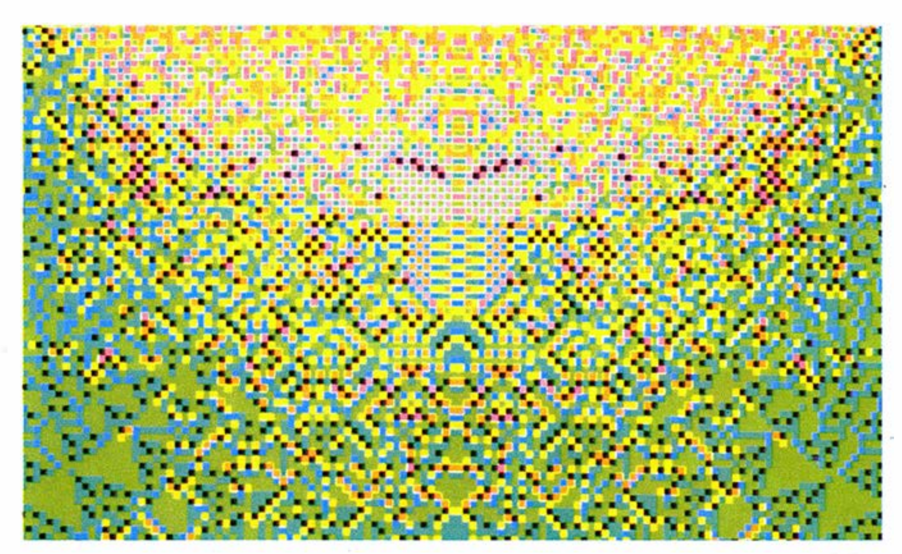
(un montón de arena) sirve de paradigma para la criticalidad auto-organizada. Algunos han simulado la dinámica de los montones de arena mediante programas de ordenador; otros, como Glenn A. Held y sus colaboradores, de IBM, han procedido a efectuar experimentos. Tanto los modelos como los experimentos ponen de manifiesto las mismas características.

Held y sus colaboradores idearon un aparato que va vertiendo arena lenta y uniformemente, a razón de un grano por vez, sobre una superficie circular plana. Al principio, los granos quedan en reposo cerca del punto de caída. Pronto empiezan a descansar unos sobre otros, creando un montoncito de pendiente suave. Ocasionalmente, al hacerse la pendiente demasiado fuerte en algún lugar de la pila, los granos se deslizan ladera abajo, provocando una pequeña avalancha. Conforme se va añadiendo más y más arena, y se va acentuando la pendiente media de la pila, aumenta parejamente el tamaño medio de las avalanchas. Comienzan a caer unos pocos granos por el borde de la superficie circular. El montón deja de crecer cuando la cantidad de arena añadida queda compensada, por tér-





1. LOS DOMINOS permiten poner de manifiesto la criticalidad, la subcriticalidad y la supercriticalidad. En el sistema crítico (*arriba*), se situaron al azar los dominós sobre la mitad de los segmentos de una red de cuadrados dispuestos al bies. Al ser derribados los dominós de la fila de abajo, el sistema crítico produjo reacciones en cadena de muchos tamaños. El sistema subcrítico (*abajo, izquierda*), en el que la densidad de dominós era mucho menor que la del valor crítico, se produjeron sólo pequeñas reacciones en cadena. El sistema supercrítico (*derecha*) —con densidad superior al valor crítico— mostró una actividad explosiva.



2. SIMULACION INFORMATICA de un apilamiento de arena. Evoluciona espontáneamente hacia un estado crítico, en el cual la adición de un solo grano puede provocar avalanchas en todo el sistema. Tras añadir granos a la pila (a lo largo de la hilera superior de la imagen), el ordenador determinaba adónde se movería cada grano y calculaba la pendiente del montoncillo en diversos puntos. Los cuadritos rosados representan las porciones más empinadas de la pila; los cuadritos negros indican regiones planas. Los granos que alcanzan los costados o la base del rectángulo caen del montón.

mino medio, con la cantidad que cae por el borde. En ese punto, el sistema ha alcanzado el estado crítico.

Cuando se añade un grano de arena a un montón que se halla en estado crítico, puede desencadenarse una avalancha de tamaño impredecible, sin que puedan excluirse acontecimientos "catastróficos". Empero, la mayoría de las veces el grano caerá sin producir avalanchas. Hemos encontrado que incluso en los mayores desprendimientos apenas interviene una pequeña proporción de los granos apilados; por tanto, ni siquiera los acontecimientos catastróficos pueden conseguir que la pendiente de la pila se desvíe significativamente de la pendiente crítica.

Las avalanchas constituyen tipos particulares de reacción en cadena, que reciben también el nombre de procesos de bifurcación. Simplificando un poco la dinámica de las avalanchas, resulta posible identificar los rasgos principales de la reacción en cadena y confeccionar un modelo.

Al principio de la avalancha, un único grano se desliza ladera abajo a causa de alguna inestabilidad en la superficie de la pila. El grano solamente se detendrá si llega a caer en una posición estable; de lo contrario, continuará ladera abajo. Si en su descenso golpea a otros granos que son casi inestables, provocará también su caída. En el desarrollo del proceso, cada grano puede detenerse o continuar cayendo, y puede provocar también la caída de otros granos. El proceso cesará cuando todas las partículas activas se hayan detenido o hayan abandonado la pila. Para medir el tamaño de la avalancha, basta el recuento del número total de partículas caídas.

La pila mantiene altura y pendiente constantes porque la probabilidad de extinción de la actividad está compensada, en promedio, por la probabilidad de que la actividad se bifurque. Así pues, la reacción en cadena mantiene un estado crítico.

Si el montón es de forma tal que la pendiente es inferior al valor crítico —el estado subcrítico—, las avalanchas serán menores que las producidas por el estado crítico. Una pila subcrítica crecerá hasta alcanzar el estado crítico. Por otra parte, si la pendiente es mayor que el valor crítico —el estado supercrítico—, las avalanchas serán mucho mayores que las generadas por el estado crítico. Un apilamiento supercrítico se desmoronará hasta alcanzar el estado crítico. Tanto los apilamientos subcríticos como los supercríticos se ven espontáneamente arrastrados hacia el estado crítico.

¿Qué sucederá al utilizar arena húmeda en lugar de arena seca, o si se intenta evitar las avalanchas construyendo defensas para nieve? Al principio, el montón húmedo produce avalanchas menores, y lo hace a ritmo menos frecuente que un apilamiento seco comparable. Tras cierto tiempo, el montón húmedo habrá crecido hasta un estado más empinado que el seco. En ese estado, el apilamiento húmedo soporta avalanchas de todos los tamaños; ha evolucionado hasta un estado crítico. Podemos observar una dinámica similar en apilamientos provistos de parapetos contra la nieve. En general, el estado crítico resiste leves alteraciones de las reglas del sistema.

El montón de arena posee dos características incongruentes a primera vista: el sistema es inestable en muchas de sus distintas localidades; sin embargo, el estado crítico es absolutamente robusto. Por una parte, los rasgos específicos, como las configuraciones locales de la arena, cambian continuamente a causa de las avalanchas. Por otra, las propiedades estadísticas, como la distribución de tamaños de las avalanchas, subsisten esencialmente idénticas.

Al observador que estudiase una región específica de un apilamiento no se le escaparían los mecanismos que provocan la caída de la arena; podría predecir incluso si se originarían en ella desprendimientos en un futuro próximo. Sin embargo, a un observador local le resultarían impredecibles las grandes avalanchas, pues éstas son consecuencia de la historia total de la pila entera. Poco importa cuál sea la dinámica local; las avalanchas persistirán, produciéndose implacablemente, con una frecuencia relativa que no es posible alterar. La criticalidad es una propiedad global del montón de arena.

Aun cuando la aportación de arena al montón se efectuara con ritmo uniforme, la cantidad que fluyera del apilamiento variaría a lo largo del tiempo. Al representar el flujo de escape en función del tiempo, observaríamos una señal muy errática, que poseería rasgos de todas las duraciones. Las señales de este tipo se denominan "ruido de fluctuación"; también, "ruido $1/f$". Hace mucho que los científicos saben que la aparición de ruido de fluctuación sugiere que la dinámica de un sistema depende fuertemente de los acontecimientos pasados. El ruido blanco, por el contrario, supone inexistencia de correlación entre la dinámica actual y los acontecimientos pasados.

El ruido de fluctuación es extraordinariamente común en la naturaleza. Se ha observado en la actividad del Sol, en la luz de las galaxias, en la corriente eléctrica que atraviesa una resistencia y en el fluir del agua en un río. Lo cierto es que la ubicuidad del ruido de fluctuación constituye uno de los grandes misterios de la física. La teoría de criticalidad auto-organizada sugiere una interpretación bastante general: el ruido de fluctuación consiste en una superposición de señales de todos los tamaños y duraciones, que tienen lugar cuando un sistema dinámico en estado crítico produce reacciones en cadena de todos los tamaños y duraciones.

Nosotros y nuestros colaboradores hemos construido muchos modelos informáticos que exhiben criticalidad auto-organizada. Estos modelos de computador nos han ayudado a comprender la dinámica de los terremotos, los ecosistemas y los fenómenos de turbulencia en los fluidos.

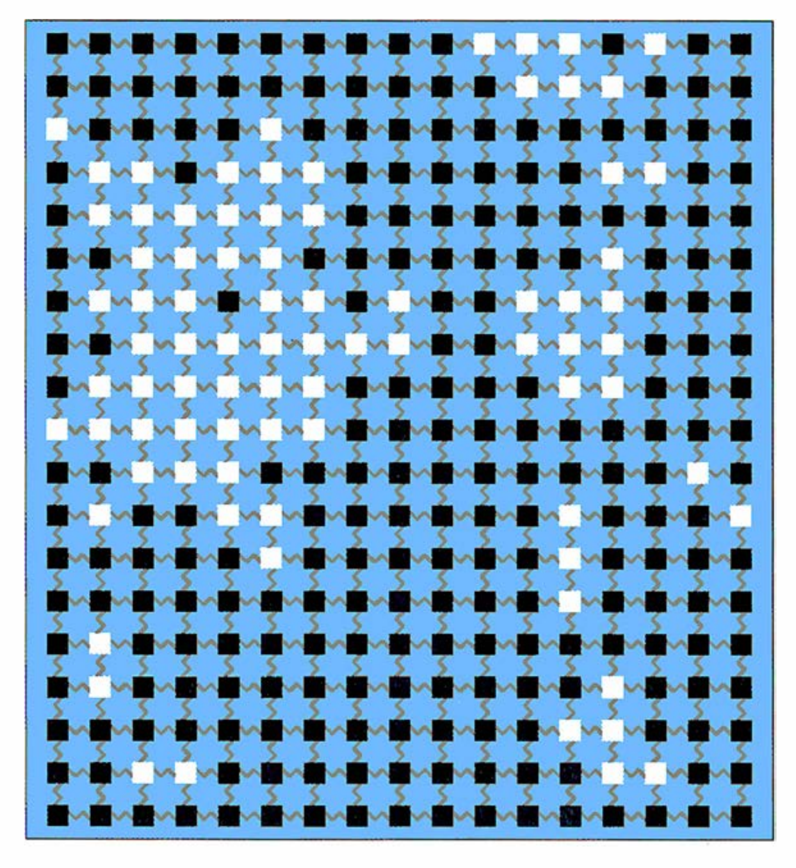
Quizá sean los modelos sismológicos los que mayor éxito han tenido. En 1956, los geólogos Beno Gutenberg y Charles F. Richter, famoso este último por la escala que lleva su nombre, descubrieron que el número de grandes terremotos guardaba relación con el número de seísmos pequeños (tal relación se ha convertido en la ley de Gutenberg-Richter). El número de terremotos que cada año liberan cierta cantidad de energía, E, es proporcional a 1 dividido por E elevado a la potencia b, siendo b un exponente cuyo valor ronda en torno a 1,5. El exponente b es universal, en el sentido de que no depende del área geográfica concreta. Por tanto, los grandes terremotos escasean mucho más que los pequeños. Por ejemplo, si en una zona se produce cada año un seísmo de energía 100 (en ciertas unidades), experimentará unos mil pequeños temblores de energía 1 cada año.

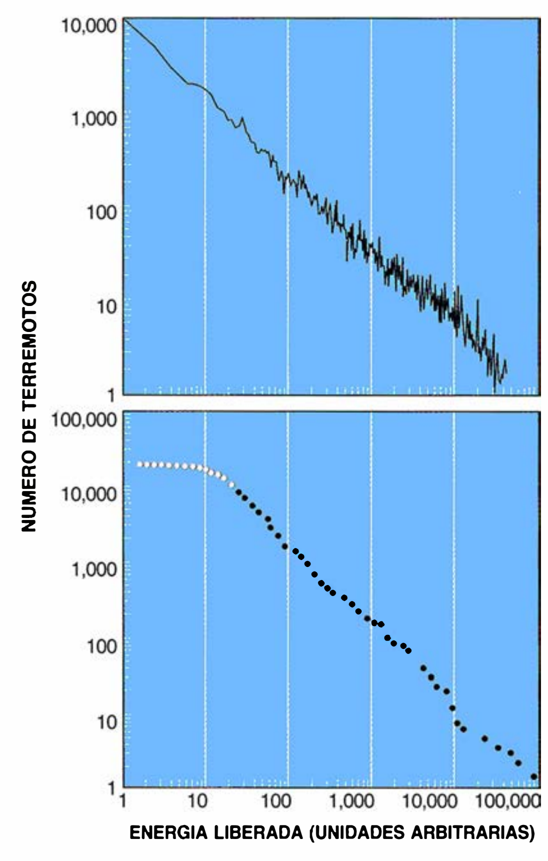
Dado que el número de terremotos pequeños guarda una relación sistemática con el número de terremotos grandes, cabe sospechar que ambos tipos de acontecimiento, grandes y pequeños, emanen del mismo proceso mecánico. Nosotros y nuestros colaboradores creíamos que la distribución potencial inversa era prueba de criticalidad auto-organizada. Sin embargo, antes de poder verificar nuestra hipótesis, nos era necesario comprender la forma de simular el proceso que origina los terremotos.

Existe consenso general en que los terremotos están provocados por un mecanismo de adherencia y deslizamiento. Ciertas regiones de la corteza terrestre se adhieren, y después se deslizan, sobre otras regiones, creando fallas. En el deslizamiento de una región sobre otra, las tensiones de la fricción se liberan y propagan a regiones adyacentes.

Para reproducir este mecanismo en el laboratorio, Vladimir Brobov y Mihail Lebyodkin llevaron a cabo un experimento consistente en aplicar presión a una barra de aluminio, que representaba una región de la corteza terrestre. La presión provocó una transición desde el flujo elástico (punto en el cual la barra retornaría a la forma original cuando cesase la presión) al flujo plástico (punto en el cual la deformación se torna irreversible). En la fase plástica se engendró una región de "falla", en la que dos partes de la barra se deslizaban una contra otra. Bobrov y Lebyodkin observaron "terremotos", de tamaño y frecuencia relacionados por una ley potencial. Cuando reprodujeron los experimentos con barras de niobio, en vez de aluminio, obtuvieron los mismos resultados, a pesar de que los mecanismos microscópicos de uno y otro material son diferentes.

Hemos construido un sencillo modelo informático que reproduce importantes características de los seísmos. Para mayor simplicidad, el modelo consta de una placa elástica y una placa rígida. La placa elástica se representa mediante una matriz bidimensional de cuadrados, cada uno conectado por muelles a sus cuatro vecinos. Al comprimir la formación de cuadrados, los muelles ejercen sobre





3. MODELO DE SEISMO que efectúa una simulación de las fuerzas sobre los bloques de la corteza terrestre. Cada vez que la fuerza ejercida sobre un bloque excede de un valor crítico, el bloque se desliza y la fuerza se transfiere a los bloques adyacentes. Los cuadrados blancos representan bloques en deslizamiento; cada cúmulo de ellos, un terremoto. El modelo produce seísmos de todos los tamaños, que van desde el corrimiento de un bloque individual hasta cúmulos "catastróficos" que se extienden por todo el sistema. El número total de sucesos de corrimiento de un cúmulo proporciona una medida de la energía liberada durante ese terremoto. La gráfica superior muestra los resultados acumulados tras 10.000 terremotos en el modelo. Como referencia, la gráfica inferior ofrece medidas correspondientes a terremotos reales. Tanto los resultados del modelo como los medidas reales se describen mediante una ley potencial: el número de terremotos de energía *E* es proporcional a *E* elevada a un exponente constante.

La criticalidad auto-organizada y los montones de arena

La teoría de criticalidad auto-organizada formula una sencilla predicción sobre apilamientos de arena: cuando sobre un montón cae un solo grano de arena, de ordinario provoca el desprendimiento de unos pocos granos, mas de vez en cuando desencadena una avalancha. Para verificar esa predicción en apilamientos de arena reales, Glenn A. Held y sus colaboradores del Centro de Investigación Thomas J. Watson, de IBM, concibieron recientemente un ingenioso experimento.

La mayor dificultad con que tropezó el grupo de IBM estribó en la construcción de un aparato que fuera aportando lentamente arena a la pila, a razón de un grano por vez. Held y sus colaboradores montaron un motor de velocidad variable en un soporte de laboratorio y sujetaron un embudo especial al eje de motor con mordazas. El embudo consistía en un bulbo de nivelación de 250 mililitros, con salida por un capilar de 23 centímetros de largo y 2,0 milímetros de luz. Después llenaron el embudo de arena y lo dispusieron con unos dos grados de depresión respecto de la horizontal, para que los granos de arena fueran deslizándose hacia el interior del tubo capilar, pero no cayeran dentro.

Cuando el motor hacía girar el embudo en torno a su eje, a unas 60 revoluciones por minuto, los granos de arena se alineaban en el tubo capilar e iban viajando en fila india hasta el extremo del tubo. Ajustando el ángulo del embudo y la velocidad de rotación del motor, el equipo logró calibrar el aparato hasta hacer que cayera un grano cada 15 seg. Situaron entonces la boca del capilar a unos 10 cm de altura sobre el platillo de una balanza de alta precisión. La balanza tenía una precisión de 0,0001 gr. y una capacidad de 100 gr. Cada grano de arena pesaba unos 0,0006 gramos; un apilamiento cuya base tuviera cuatro cm de diámetro pesaba 15 gr.

Como soporte de los montones, construyeron bandejas circulares, cuyos diámetros iban de 1 a 8 centímetros. Cada bandeja estaba sujeta a una peana de 2,5 cm de altura y 0,5 cm de diámetro. La peana, a su vez, se encontraba conectada a una base circular de cuatro centímetros de diámetro. El montaje entero, que ofrecía el aspecto de una bandeja, descansaba sobre el platillo de la balanza. Construyeron un faldón de metal en torno a la peana del "carrete" para evitar que la arena desprendida del montón cayera sobre el platillo; de este modo, la balanza registraría sólo el peso del apilamiento propiamente dicho. La balanza fue cubierta con una caja transparente, para evitar que las corrientes de aire la perturbasen o arrastrasen los granos de arena. Todo el montaje se instaló sobre una mesa pesada para minimizar el efecto de las vibraciones.

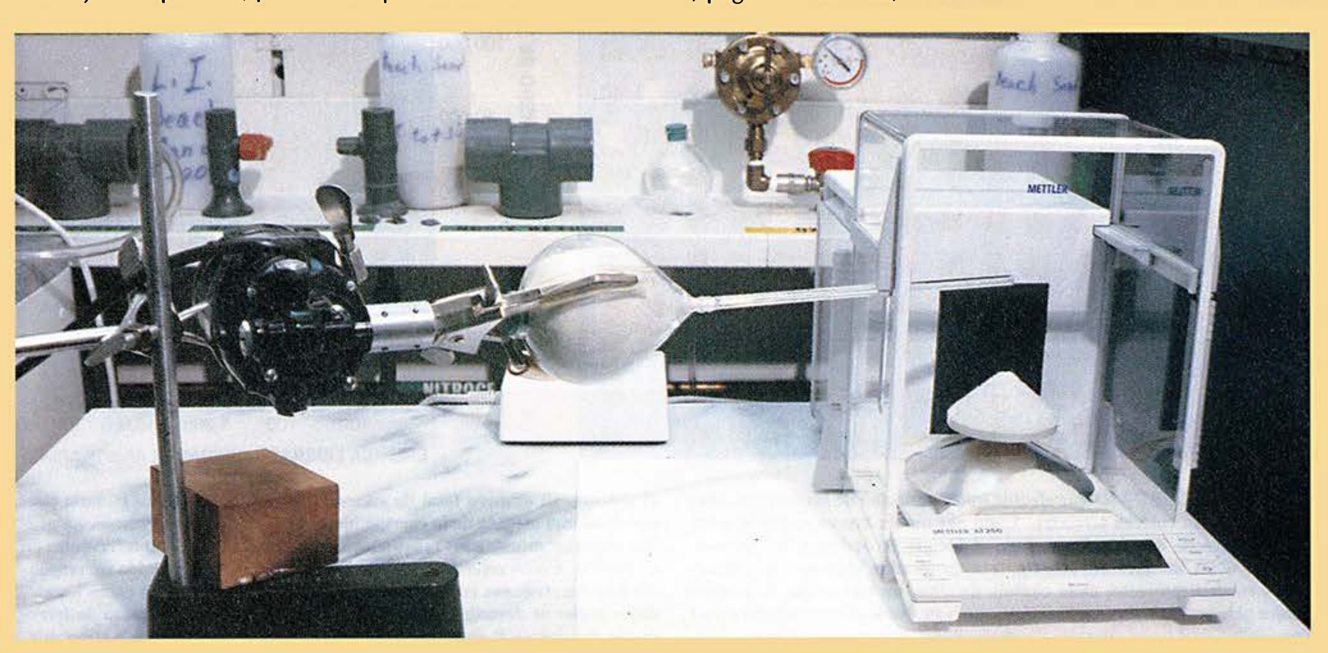
En los primeros experimentos, Held y colaboradores utilizaron partículas de óxido de aluminio, pero después se vio que la arena de la playa servía igual de bien. Prepararon la arena secándola en un horno y la cernieron, al principio con una criba gruesa y con otra más fina después. Conservaron los granos que atravesaron la malla más gruesa (ocho hilos por cm), pero eliminaron los que se colaron a través de la malla fina (10 hilos cruzados por cm).

Llenaron el embudo de arena y moldearon una pila sobre una bandeja circular de cuatro cm. Para garantizar que el montón se estabilizase de forma natural, dejaron caer granos sobre la pila durante varias horas. Después, observaron avalanchas de arena caer en cascada ladera abajo. Conforme caía por los bordes de la bandeja, midieron las fluctuaciones de la masa del montón. Utilizaron un ordenador personal para controlar el motor y supervisar la balanza. Cuando el ordenador detectaba un cambio de masa comparable a un grano de arena, detenía la rotación del embudo y, con ello, el flujo de arena. Una vez estabilizada la balanza, el ordenador registraba la masa y volvía a poner en marcha el motor para reanudar el proceso de caída.

Mantuvieron el sistema en funcionamiento durante dos semanas, registrando la caída de más de 35.000 granos de arena sobre la bandeja de cuatro centímetros. Observaron avalanchas de una amplia gama de tamaños. La masa del apilamiento fluctuó entre uno y varios centenares de granos cuando le fueron añadidos al montón desde uno hasta varios millares de granos. Tal resultado sugiere que la pila se había organizado en un estado crítico.

Sin embargo, cuando el equipo aumentó el diámetro de la base del montón, utilizando una bandeja de ocho centímetros, vio que la pila producía sólo avalanchas grandes (de unos cuatro gramos). Concluyeron que las pilas de este tamaño no exhiben criticalidad auto-organizada, aunque no comprenden por qué sólo los montones pequeños evolucionan de forma espontánea hacia un estado crítico.

Se podrá hallar más información sobre el experimento del apilamiento de arena en el artículo "Experimental Study of Critical Mass Fluctuations in an Evolving Sandpile", por Glenn A. Held et al., en *Physical Review Letters*, vol. 65, n.º 9, páginas 1120-1123; 1990.



los cuadros una fuerza proporcional a la compresión. (Posteriormente introdujimos otros tipos de fuerzas, sin que ello produjera apenas cambios en la dinámica.) Los bloques de la placa elástica interaccionan con la placa rígida por fricción.

Cuando la fuerza ejercida por el muelle sobre un determinado cuadro excede de cierto valor crítico, el cuadro se desliza. El bloque continúa moviéndose hasta que la fuerza del muelle cae por debajo del valor crítico. La fuerza perdida por el bloque se transfiere equitativamente a sus cuatro vecinos. (Durante este proceso, la energía potencial almacenada en los muelles se convierte primero en energía cinética y se disipa después, cuando las fuerzas de rozamiento desaceleran los bloques.) El modelo describe la distribución de fuerzas antes y después de cada episodio, pero no los movimientos del bloque ni otros detalles del proceso dinámico.

Cuando el modelo se excita incrementando la fuerza uniforme y progresivamente sobre todos los bloques en la misma dirección, comienza a producir una serie de terremotos. Estos son pequeños al principio, pero luego el modelo evoluciona hacia un estado crítico, en el cual lo mismo se generan terremotos grandes que pequeños. El incremento uniforme de fuerza se compensa con la liberación de fuerzas en el contorno.

Hemos estudiado el modelo con máxima intensidad después de que el sistema hubiera evolucionado hasta el estado crítico. Suponemos que la corteza terrestre ha evolucionado ya hasta su fase crítica, estacionaria, y que, por tanto, los terremotos reales pueden ser remedados por el estado crítico del modelo.

En el modelo, la energía liberada durante un terremoto está relacionada con el número de episodios deslizantes posteriores a una inestabilidad individual en un cierto "epicentro". En realidad, si se cuenta el número de terremotos de cada tamaño que tienen lugar durante un período prolongado se obtiene una distribución de ley potencial, similar a la ley Gutenberg-Richter. Los terremotos catastróficos están representados por la porción de altas energías de la curva potencial correspondiente, que es posible extrapolar desde la porción de baja energía, indicativa de los terremotos pequeños. No existe un mecanismo de los terremotos grandes.

Hemos creado modelos de dos, tres y cuatro dimensiones, en los cuales cada bloque está conectado a sus vecinos por cuatro, seis y ocho muelles, respectivamente. La dimensión determina el exponente b de la ley potencial. En la imagen típica de la reacción en cadena, diferentes valores de b corresponden a diferentes acoplamientos entre los procesos de bifurcación individuales. Sergei P. Obukhov ha demostrado que, en dimensión cuatro o superior, los procesos de bifurcación individuales son independientes, pudiéndose determinar por medios analíticos que el valor de b es 1,5.

Las regiones activas de los terremotos reales son tridimensionales. Hasta el momento, la única forma de predecir el valor real de b es por la vía de la simulación en el ordenador. No podemos esperar que un modelo muy simplificado proporcione los exponentes correctos correspondientes a la distribución de terremotos reales. No obstante, el modelo sugiere que los sistemas con criticalidad auto-organizada deberían dar origen a leyes potenciales; recíprocamente, la ley Gutenberg-Richter puede tomarse como prueba de que la corteza terrestre está enclavada en un estado perpetuamente crítico.

Investigadores de todo el mundo han aplicado la teoría de criticalidad auto-organizada para dar cuenta de otras peculiaridades de los seísmos. Keisuke Ito y Mitsuhiro Matsuzaki lograron explicar la distribución espacial de los epicentros merced a un modelo ligeramente modificado. También explicaron la ley de Omori, sencilla ley empírica que da el número de terremotos secundarios de una magnitud determinada. Anne y Didier Sornette estudiaron los intervalos que median entre terremotos grandes y hallaron regularidades que podrían tener importantes aplicaciones en la predicción a largo plazo de terremotos. Jean M. Carlson y James S. Langer crearon un modelo unidimensional que simulaba los movimientos de la corteza terrestre a lo largo de una falla, hallando que el modelo evolucionaba realmente hacia un estado crítico.

La teoría de criticalidad auto-organizada no sólo ha logrado explicar la evolución de los terremotos, sino que ha conseguido también describir la distribución de los epicentros de los seísmos. Hace más de un decenio que los investigadores saben que la distribución de objetos como las montañas, las nubes, las galaxias y los vórtices de los fluidos turbulentos admiten descripción en el marco de leyes potenciales. El número de objetos comprendidos, pongamos por caso, en el interior de una esfera de radio r es proporcional a una potencia de r con exponente constante D. Tales distribuciones de objetos suelen denominarse fractales. Hemos hallado que la distribución de los epicentros de los terremotos está descrita por fractales. En nuestra opinión, los fractales vendrían a ser "instantáneas" de procesos críticos auto-organizados. Las estructuras fractales y el ruido de fluctuación constituyen, por así decirlo, las huellas dactilares espaciales y temporales de la criticalidad auto-organizada.

La predicción de terremotos sigue siendo una tarea difícil. La estabilidad de la corteza terrestre da signos de sensibilidad extrema hacia las condiciones iniciales del sistema. En ocasiones, acontecimientos muy distantes del epicentro pueden afectar a la evolución de un terremoto.

Para evaluar la exactitud de las predicciones efectuadas para un sistema dinámico, hay que conocer con cierta precisión las condiciones iniciales, amén de las reglas que gobiernan su dinámica. En sistemas no caóticos, como el de la Tierra en su órbita en torno al Sol, la incertidumbre se mantiene constante en todo momento: podemos determinar la posición de la Tierra dentro de un millón de años casi con la misma precisión con que podamos determinarla hoy.

En cambio, en los sistemas caóticos, las pequeñas incertidumbres iniciales crecen exponencialmente con el tiempo. Además, conforme se intenta llevar las predicciones a mayores plazos futuros, la cantidad de información que es preciso recoger sobre las condiciones iniciales aumenta exponencialmente con el tiempo. En su mayor parte, este crecimiento exponencial impide tales pronósticos.

Para verificar la precisión de las predicciones de nuestro modelo sísmico procedimos a efectuar dos simulaciones del estado crítico. Las simulaciones se diferencian en una pequeña fuerza aleatoria aplicada sobre cada bloque, representativa de una pequeña incertidumbre acerca de las condiciones iniciales. Cuando ponemos en operación las dos simulaciones, la incertidumbre crece con el tiempo, pero mucho más lentamente que para los sistemas caóticos. La incertidumbre crece según una ley potencial, en vez de proceder de acuerdo con una exponencial. El sistema evoluciona al borde del caos. Este comportamiento, conocido por caos débil, es resultado de la criticalidad auto-organizada.

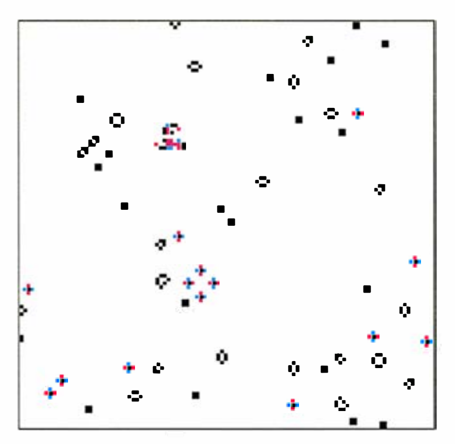
El caos débil se diferencia notoriamente del comportamiento caótico absoluto. Los sistemas plenamente caóticos se caracterizan por una

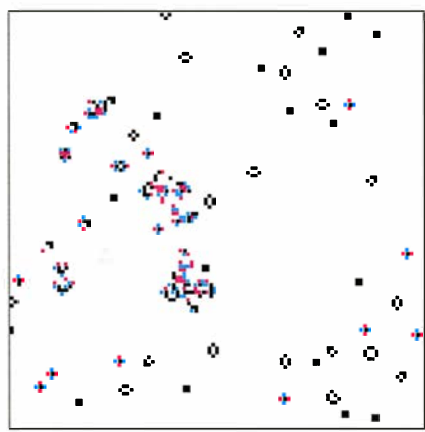
escala temporal más allá de la cual resulta imposible efectuar predicciones. Los sistemas débilmente caóticos carecen de tal escala temporal y permiten predicciones a largo plazo.

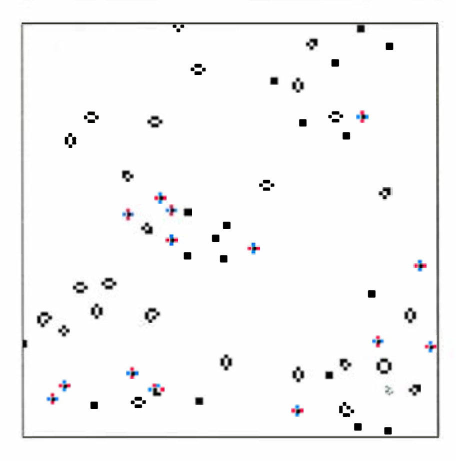
Como hemos visto que todos los sistemas críticos auto-organizados son débilmente caóticos, tenemos confianza en que el caos débil sea muy común en la naturaleza. Revestiría el mayor interés saber si la imprecisión de las predicciones sismológicas, económicas o climatológicas aumenta, en general, según una ley potencial y no según una exponencial.

Por ejemplo, si el tiempo meteorológico es plenamente caótico, y si 100 observatorios recogen información suficiente para efectuar predicciones con dos días de anticipación, 1000 observatorios podrían entonces permitir predicciones con cuatro días de validez. Con un tiempo débilmente caótico, 1000 observatorios podrían permitir pronósticos a 20 días.

Con un cambio de lenguaje (y una pizca de imaginación), resulta posible transformar el modelo del montón de arena o del terremoto en muchas otras situaciones. Se ha demostrado, a ese propósito, que el tráfico de una autopista obedece a una ley de ruido fluctuante. En las retenciones, el clásico "arranca-para" puede asociarse a una serie de avalanchas críticas que se propagan en el tráfico.







4. JUEGO DE LA VIDA, remedo de la evolución de una colonia de organismos. Sugiere también que la teoría de criticalidad auto-organizada puede explicar la dinámica de los ecosistemas. Los cuadrados negros indican organismos vivos; los rojos, organismos moribundos y los azules, el inminente nacimiento de un organismo. El primer cuadro muestra la colonia al poco de haberse añadido un organismo a una configuración estable. En los cuadros segundo y tercero, la colonia evoluciona hacia un estado nuevo.

Los modelos de tráfico, los apilamientos de arena y los terremotos se asemejan en que el número de elementos se conserva siempre. Así, el número de granos de un montón es siempre igual al número de los que hemos dejado caer menos el de los desprendidos de él. La conservación de elementos constituye una propiedad importante de muchos sistemas que evolucionan espontáneamente hacia un estado crítico. La teoría de criticalidad auto-organizada no se limita, empero, a sistemas que posean leyes locales de conservación, como demuestra el "juego de la vida".

En 1970, el matemático John H. Conway inventó este juego, que fue seguidamente popularizado por Martin Gardner en estas páginas. El "juego de la vida" remeda la evolución de una colonia de organismos vivos y simula la generación de complejidad en la naturaleza.

Al empezar el juego, las piezas u organismos se sitúan al azar sobre un tablero formado por casillas cuadradas. Cada ubicación está ocupada a lo sumo por un organismo; la rodean otras ocho casillas vecinas. Para determinar el estado de cada ubicación en cada turno del juego, es preciso contar el número de organismos que moran en los ocho emplazamientos vecinos. Si al contar en torno a una casilla dada encontramos dos casillas vivas, el estado de tal casilla no varía, ya se halle viva o muerta. Si al contar hay tres casillas vivas, las ubicaciones vivas suscitan en ella el nacimiento de un nuevo organismo si la casilla estaba muerta, o sostienen la vida del que allí moraba en la generación anterior. En los restantes casos, los organismos mueren, sea por superpoblación o por soledad.

El juego prosigue según estas reglas hasta alcanzar el "reposo" en un estado periódico sencillo, que contiene colonias estables. Cuando el juego se perturba añadiendo una célula "viva" extra, es corriente que se den prolongados períodos de actividad transitoria.

En unión de Michael Creutz, hemos estudiado el "juego de la vida" para determinar si el número de emplazamientos vivos fluctuaba con el tiempo de forma similar al tamaño de las avalanchas en el modelo del montón de arena. Una vez que el sistema se establecía en su estado de reposo, añadíamos un organismo más en una posición tomada al azar, esperábamos a que el sistema se estabilizase y repetíamos el procedimiento. A continuación, medíamos el número total de nacimientos y defunciones de la "avalancha" subsiguiente a cada perturbación adicional. Hallamos, en efecto, que la distribución obedecía una ley potencial, indicativa de que el sistema se había organizado hasta alcanzar un estado crítico. Descubrimos también que la distribución de ubicaciones vivas es un fractal descriptible por una ley potencial. El número medio de casillas activas situadas a distancia r de una casilla activa dada era proporcional a r elevada al exponente D, resultando en este caso que D rondaba el valor 1,7.

Pero, ¿es tal criticalidad accidental, en el sentido de que solamente se produce para las muy particulares reglas inventadas por Conway? Para hallar la respuesta, procedimos a construir modelos que son variantes del "juego de la vida". Algunas variantes fueron tridimensionales; en otras, procedimos a añadir organismos al sistema mientras éste aún se encontraba en evolución, o bien los introdujimos en lugares específicos y no al azar. Todas las variaciones evolucionaron hacia un estado crítico y pudieron describirse mediante leyes potenciales, únicamente dependientes, al parecer, de la dimensión espacial.

Nos parece que nuestros modelos pueden tener importantes ramificaciones en la biología real. El "juego de la vida" puede verse como un modelo de "juguete" de un sistema coevolutivo. Cada ubicación podría representar un gen de una especie muy sencilla. Tal gen puede adoptar los valores 1 o 0. La estabilidad de cada valor depende del ambiente, expresado por los valores de los genes de

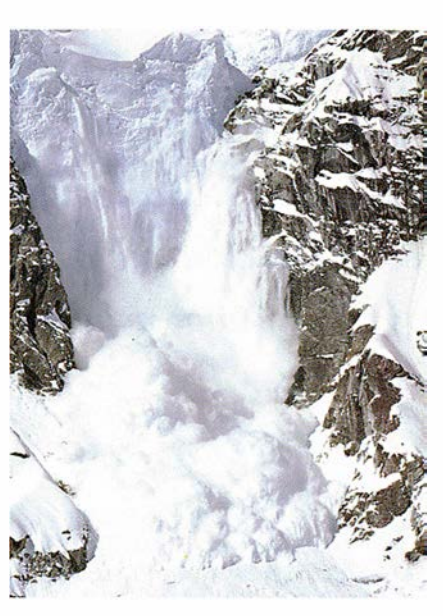
especies cercanas. El proceso coevolutivo lleva entonces al sistema desde un estado inicial arbitrario al estado crítico, altamente organizado, y dotado de configuraciones dinámicas y estáticas complejas. La complejidad de la dinámica global guarda íntima relación con la criticalidad de la dinámica. De hecho, cabría que las teorías de complejidad y criticalidad resultasen una y la misma cosa.

El biólogo Stuart Kauffmann, ha propuesto un modelo de evolución en el cual las especies están representadas por ristras de números (genes). Los genes interactúan en el seno de una misma especie y entre especies. La adaptación de una especie individual queda así acoplada a la adaptación de otras. Kauffmann opina que la complejidad de la vida puede encontrarse estrechamente relacionada con la existencia de un estado crítico. Nuestros estudios indican que la evolución podría en efecto tomar a un sistema dinámico interactivo, más o menos sencillo y aleatorio, hasta llevarlo precisamente a un estado crítico. De ser correcto tal planteamiento, la evolución opera al borde del caos. La extinción de los dinosaurios, por ejemplo, puede considerarse como una avalancha en la dinámica de la evolución; no sería necesaria la intervención de agentes exteriores, como meteoritos o volcanes.

Philip W. Anderson, Brian W. Arthur Kauffmann y uno de nosotros (Bak) se percataron de que las fluctuaciones que se dan en la economía podrían muy bien corresponder a avalanchas de un estado crítico auto-organizado de ese sistema. Benoit B. Mandelbrot ha analizado indicadores económicos, como el índice Dow Jones, y ha encontrado en ellos oscilaciones similares a las del ruido de fluctuación. Los diversos estados estacionarios metaestables de la economía podrían corresponder a los diversos estados metaestables de un montón de arena o de la corteza terrestre.

Los modelos convencionales suponen para la economía la existencia de una posición de equilibrio fuertemente estable, por lo que sólo pueden producirse grandes fluctuaciones agregadas a resultas de impactos externos que afectan simultáneamente y de igual manera a muchos sectores. No obstante, cuesta identificar las razones de fluctuaciones de tan gran escala como la Depresión de los años treinta. Si, por otra parte, la economía constituye un sistema crítico autoorganizado, es de esperar que en ella acontezcan fluctuaciones de gran escala, más o menos periódicamente, incluso en ausencia de trastornos fuertes suprasectoriales.

Para verificar la viabilidad de estas ideas, nosotros, hemos creado, con José A. Scheinkman y Michael Woodford, un modelo sencillo en el que las compañías fabricantes de diversos productos ocupan posiciones en un retículo bidimensional, al que llamamos red económica. Cada compañía se surte de otras dos situadas en posiciones adyacentes. A continuación, cada una fabrica nuevos productos, que se esfuerzan en vender en un mercado abierto. Si la demanda de los productos de cada compañía varía al azar en una pequeña medida, muchas compañías pueden experimentar una "avalancha" en producción y ventas. Las simulaciones indican que un tal modelo tiende hacia un estado crítico auto-organizado, de forma parecida a la del modelo "montón de arena". Las grandes fluctuaciones constituyen propiedades intrínsecas e inevitables del modelo económico.



5. DINAMICA DE LAS AVALANCHAS y su explicación en el marco de la teoría de criticalidad; enuncia ésta que las pilas de nieve y otros grandes sistemas naturales evolucionan espontáneamente hacia un estado crítico donde acontecimientos de poca monta provocan reacciones en cadena. Si la teoría prueba ser correcta, los analistas mejorarán las predicciones de las catástrofes.

Puede que la teoría de criticalidad auto-organizada encuentre también aplicaciones en la dinámica de fluidos. Se supone desde hace mucho que en los fluidos turbulentos la energía se almacena en vórtices y remolinos de todos los tamaños. Mandelbrot ha sugerido que la disipación de energía se encontraría confinada a una diminuta porción del espacio, localizada en una estructura fractal compleja. Aunque ello parece concordar con los experimentos, no se ha concretado ninguna teoría ni cálculo que respalde esta imagen.

En colaboración con Tang, hemos construido un sencillo modelo "de juguete" para la turbulencia, que opera en un estado crítico auto-organizado. El modelo simula incendios forestales, suponiendo que los "árboles" crecen uniformemente y arden (energía disipada) sobre un fractal. Se puede considerar que la disipación de energía está causada por una sucesión de fuegos que se propagan a modo de avalanchas. En el estado crítico, existe una distribución de fuegos y bosques de todos los tamaños, en correspondencia con el hecho de que, durante la turbulencia, se almacene energía en vórtices de todos los tamaños. Aunque el modelo nada tiene de realista por lo que se refiere a turbulencias en los líquidos, podemos, no obstante, inducir que la turbulencia constituye verosímilmente un fenómeno crítico auto-organizado. Una consecuencia de tal hipótesis (fácil de estudiar por vía experimental) es que la turbulencia plenamente desarrollada no constituye un fenómeno caótico "fuerte", en contra de lo que suele suponerse. La turbulencia sería entonces débilmente caótica, como en el caso del modelo sismológico.

Se podrían imaginar ejemplos más exóticos de criticalidad auto-organizada. A lo largo de la historia, las guerras y las interacciones pacíficas podrían haber dejado al mundo en un estado crítico, en el que los conflictos y la desazón social se propagan como avalanchas. La criticalidad auto-organizada podría dar cuenta incluso de cómo se propaga la información a través de las redes neuronales del cerebro.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE PHYSICS OF FRACTALS. Per Bak y Kan Chen en *Physica D*, vol. 38, págs. 5-12; 1989.

SELF-ORGANIZED CRITICALITY AND EARTHQUAKES. Anne Sornette y Didier Sornette en *Europhysics Letters*, vol. 9, n.º 3, págs. 197-202; 1989.

SELF-ORGANIZED CRITICALITY IN THE "GAME OF LIFE". Per Bak, Kan Chen y Michael Creutz en *Nature*, vol. 342, n.º 6251, págs. 780-782; 14 de diciembre de 1989.

A FOREST-FIRE MODEL AND SOME THOUGHTS ON TURBULENCE. Per Bak, Kan Chen and Chao Tang en *Physics Letters*, vol. 147, n.º 5-6, págs. 297-300; 1990.

Plegamiento de las proteínas

En teoría, todo lo que se necesita saber para plegar una proteína en su conformación biológicamente activa es la secuencia de sus aminoácidos. ¿Por qué nunca ha conseguido nadie conciliar la teoría con la realidad?

Frederic M. Richards

Moría la década de los cincuenta cuando Christian B. Anfinsen y sus colaboradores, del Instituto Nacional de la Salud, hicieron un notable descubrimiento. Se hallaban estudiando una añeja cuestión biológica: ¿cuál era la causa de que las proteínas recién sintetizadas —que semejaban hebras ligeramente retorcidas y se mostraban inactivas— se convirtieran en ovillos moldeados específicamente, capaces de ejecutar tareas cruciales en una célula viva? El equipo, a lo largo de su estudio, se encontró con que la respuesta era más simple de lo que nadie hubiese podido imaginar.

Parecía que la secuencia aminoacídica de una proteína, un rasgo unidimensional, resultaba plenamente suficiente para especificar la conformación tridimensional definitiva de la molécula, así como su actividad biológica. (Las proteínas están constituidas por un conjunto de sólo 20 aminoácidos, que se ensamblan en una cadena siguiendo las instrucciones contenidas en los genes.) Factores externos, como enzimas que pudiesen catalizar el plegamiento, no debían ser considerados participantes forzosos en el proceso.

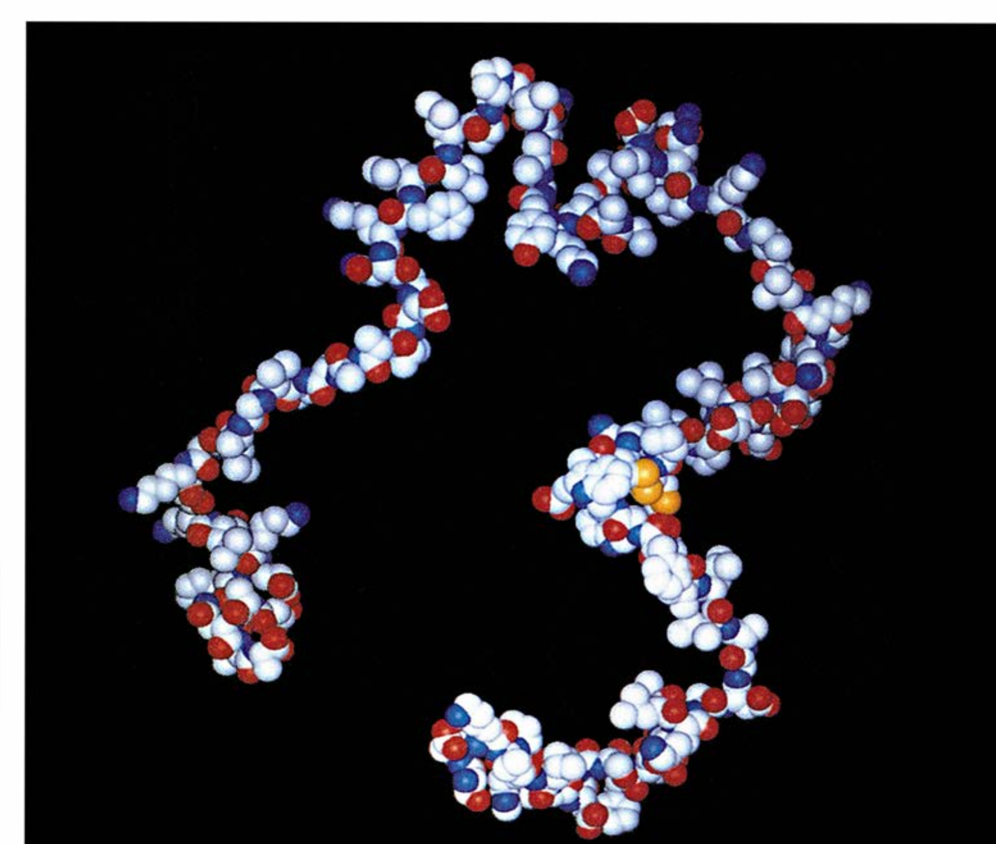
El hallazgo, que desde entonces se ha confirmado una y otra vez —al menos para proteínas relativamente pequeñas—, sugería que las fuerzas determinantes del adecuado plegamiento dentro de la célula podían, en teoría, derivarse de los principios básicos de la química y la física. Esto es, si se disponía de antemano de la secuencia de aminoácidos de una proteína, todo lo que debía tenerse en cuenta serían las propiedades de cada aminoácido y su comportamiento en disolución acuosa. (El interior de la mayoría de las células está constituido por un 70 o 90 por ciento de agua.)

La verdad es que predecir la conformación de una proteína partiendo de su secuencia aminoacídica no constituye ninguna tarea sencilla. A treinta años del hito de Anfinsen, centenares de científicos están todavía trabajando sobre esta cuestión, que ha venido a denominarse el problema del plegamiento proteico.

La solución trasciende del mero interés académico. Muchos de los productos más buscados por la naciente industria biotecnológica son nuevas proteínas. Es ya factible diseñar genes que codifiquen la síntesis de tales proteínas, pero no se ha disipado el temor a plegamientos defectuosos.

Hubo un tiempo en que quienes trabajábamos en el problema del plegamiento dudábamos de si hallaríamos algún día la respuesta. Ahora, los adelantos teóricos y experimentales, entremezclados con un creciente interés del sector industrial, han promovido un renovado optimismo.

La mayor parte de la información disponible ha emergido de estudios sobre proteínas globulares de reducido tamaño, solubles en agua, que contienen 300 aminoácidos o menos. La importancia relativa de diversas reglas de plegamiento y ensamblaje puede, en estas proteínas, variar ligeramente con respecto a otras; en particular, con respecto a las proteínas fibrosas largas y variedades que residen en las membranas celulares. Y así se ha demostrado recientemente que algunas proteínas de gran tamaño requieren para plegarse el concurso de otras proteínas, las chaperoninas.



FREDERIC M. RICHARDS preside la cátedra Sterling de biofísica y bioquímica de la Universidad de Yale. Richards entró en su claustro docente en 1955, tres años después de haberse doctorado por la Universidad de Harvard.

No abordaremos esas complejidades en el artículo; nos limitaremos a la reacción de plegamiento escueta, acometida por un gran número de proteínas.

Sería maravilloso que los investigadores dispusiesen de un microscopio con resolución atómica, capaz de filmar moléculas proteicas, una a una, plegándose desde su estado extendido e inestable hasta su forma final o estado nativo, más estable. A partir de un conjunto tal de filmaciones podrían apreciarse directamente todos los aspectos de las rutas de reacción. Por desgracia, tal instrumento no existe y los investigadores deben recurrir a medidas mucho menos directas y a razonamientos muy cautos.

El análisis de las estructuras tridimensionales de proteínas, lo mismo desplegadas que completamente plegadas, ofrece valiosos indicios acerca de las reglas de plegamiento. Ayuda también a ello el examen de las propiedades de los distintos aminoácidos y de péptidos pequeños (cadenas lineales de aminoácidos). Para nuestra fortuna, la arquitectura de centenares de proteínas nativas se ha establecido mediante la cristalografía de rayos X y, más recientemente, la resonancia magnética nuclear (RMN). Ambas técnicas han avanzado espectacularmente durante la última década, al igual que el trabajo teórico encaminado a predecir matemáticamente el plegamiento mediante ordenadores.

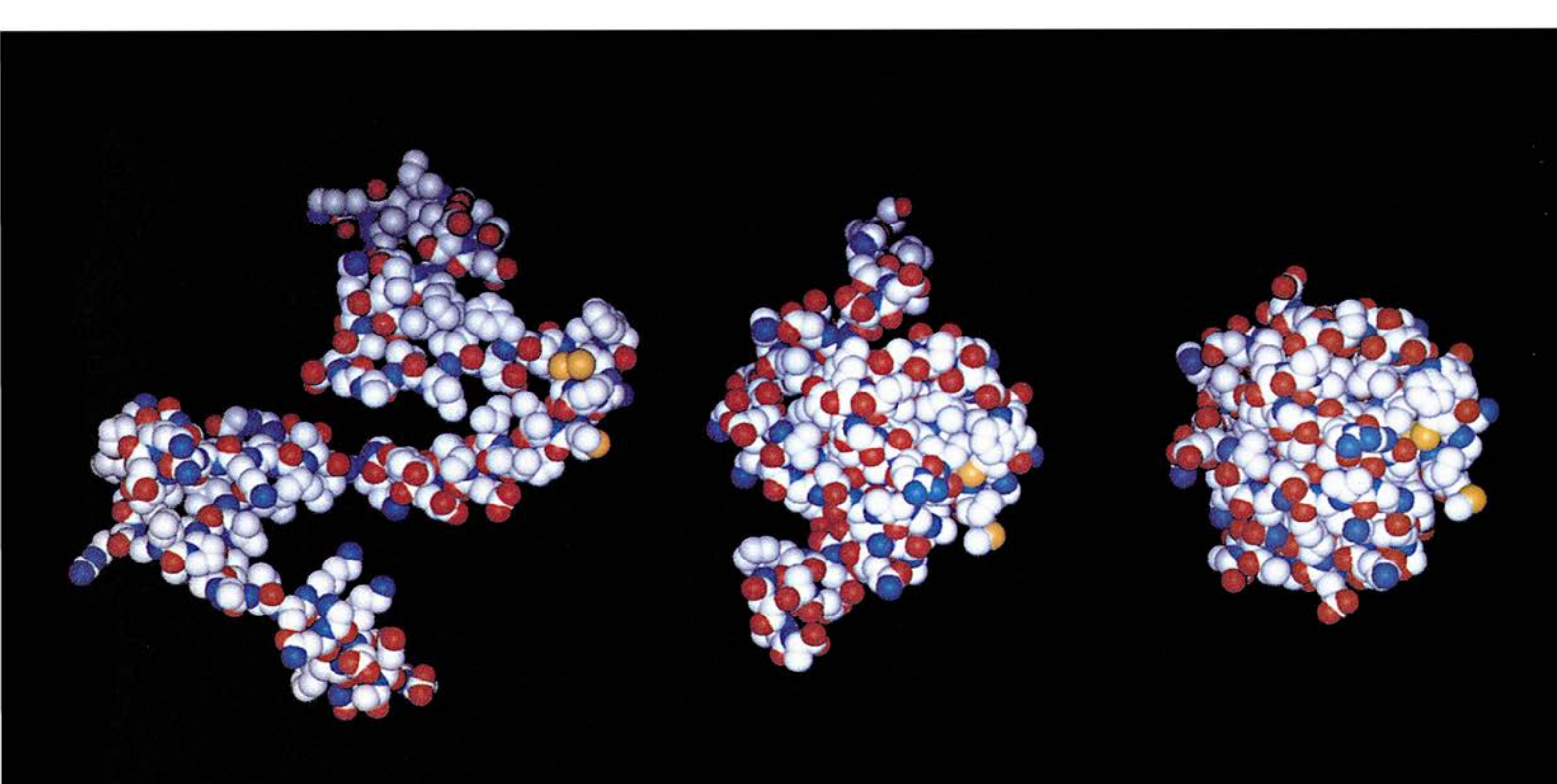
Los aminoácidos solitarios poseen un átomo central de carbono —llamado carbono alfa— unido a un grupo amino (NH_2), un grupo carboxílico (COOH) y una cadena lateral. Las diferencias entre los aminoácidos obedecen, pues, a variaciones, en sus cadenas laterales, de forma, tamaño y polaridad. La forma y el tamaño afectan el empaquetamiento conjunto de los aminoácidos en la molécula final. La polaridad (o su carencia) determina la naturaleza y consistencia de las interacciones entre los aminoácidos de la proteína y también entre la proteína y el agua.

Por ejemplo, los aminoácidos polares se relacionan fuertemente entre sí mediante las interacciones electrostáticas. Las moléculas se consideran polares si poseen una carga formal (por pérdida o ganancia de uno o varios electrones) o si, a pesar de resultar eléctricamente neutras en su conjunto, presentan regiones donde predominan cargas positivas o negativas. (Las cargas positivas las aportan los protones de los núcleos atómicos, mientras que las negativas proceden de los electrones que envuelven al núcleo.) Las moléculas se atraen cuando las regiones de carga opuesta se aproximan; se repelen cuando las regiones de igual carga se acercan.

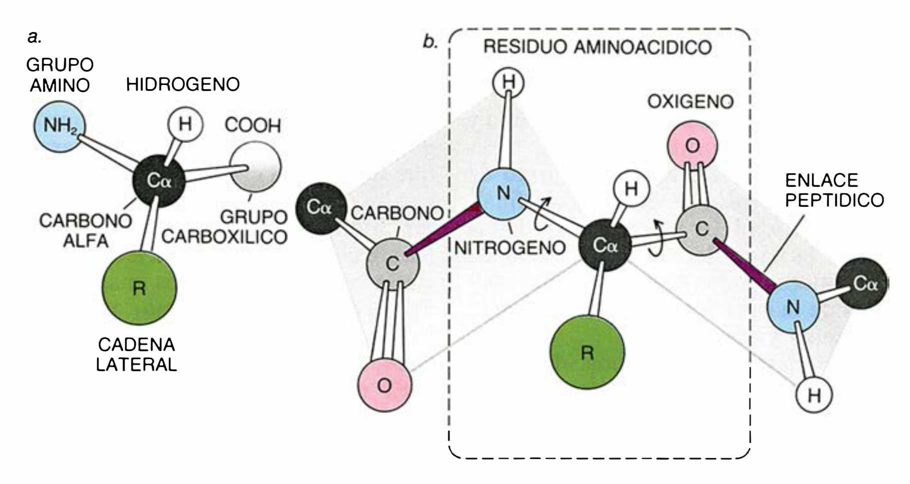
Los aminoácidos apolares pueden también atraerse o repelerse, aunque de forma más liviana, debido a las llamadas fuerzas de van der Waals. Los electrones y los protones vibran constantemente, vibraciones que se traducen en atracción entre substancias próximas. La atracción se convierte en repulsión en el instante en que las substancias están a punto de entrar en contacto.

Los aminoácidos polares tienden a ser hidrófilos en disolución acuosa; atraen las moléculas de agua, que son de suyo bastante polares. En contraposición, los aminoácidos apolares, que en general contienen cadenas laterales hidrocarbonadas, tienden a ser hidrófobos: se mezclan pobremente con el agua y "prefieren" asociarse entre sí. Podríamos imaginarlos como escurridos de agua, tal es la fuerte atracción entre substancias polares.

El enlace peptídico que une un aminoácido con su adyacente en una secuencia influye también en el plegamiento; constriñe substancialmente el universo de conformaciones que pueda adoptar el armazón de la proteína (las series repetitivas de carbonos alfa, carbonos carboxílicos y nitrógenos amínicos de una cadena peptídica). Un enlace peptídico se forma cuando el carbono carboxílico de un aminoácido se une al nitrógeno amínico del adyacente, liberándose una molécula de agua. La fuerte unión establecida entre los aminoácidos conectados —llamados residuos una



1. PLEGAMIENTO de la tiorredoxina. Nos sirve de ejemplo para ilustrar el seguido por pequeñas proteínas: la cadena inestable, inicialmente abierta (*primera por la izquierda*), se compacta de manera progresiva (*dibujos centrales*), hasta acabar adoptando una forma esférica (*derecha*). Las fases intermedias mostradas pertenecen al terreno de la hipótesis, porque sus configuraciones —igual que acontece con las de los intermediarios de la mayoría de proteínas— no se conocen. El color blanco representa los átomos de carbono; el rojo, los de oxígeno; el azul, los de nitrógeno; y el amarillo, los de azufre.



2. LOS AMINOACIDOS se engarzan concatenadamente en una proteína, mediante uniones fuertes que se trenzan entre el carbono carboxílico de un aminoácido y el nitrógeno amínico del adyacente. Debido a que la unión resultante, conocida por enlace peptídico, mantiene los átomos rígidamente enlazados en un plano, la unión reduce las opciones conformacionales de la proteína. El plegamiento se consigue gracias, sobre todo, a la rotación alrededor de los ejes de los enlaces que conectan el carbono alfa central con el nitrógeno del grupo amínico y el carbono del radical carboxílico.

vez unidos— adquiere considerable rigidez.

A consecuencia de lo anterior, la rotación sobre el enlace peptídico queda muy limitada. Los átomos comprendidos entre carbonos alfa yacen en un único plano; constituyen, pues, esencialmente, una superficie rígida en forma de plato. Por consiguiente, el plegamiento del armazón peptídico se logra principalmente por la rotación de los platos sobre otros enlaces —es decir, aquellos enlaces que conectan los platos a los carbonos alfa.

El estudio de las peculiaridades de las proteínas desplegadas o desnaturalizadas ha aportado también pistas para descubrir cómo se realiza el plegamiento. A las proteínas recién sintetizadas o desplegadas se las supone a menudo ovillos al azar, dando a entender que no existen diferencias apreciables de una región a otra del armazón proteico. En realidad, las cadenas poseen probablemente algunas regiones retorcidas, asociadas entre sí o distintas de las restantes de la molécula. Algunas de esas subestructuras, inestables y fluctuantes quizá, podrían servir de "semillas" alrededor de las cuales se constituyesen, con el tiempo, regiones esculpidas de forma estable.

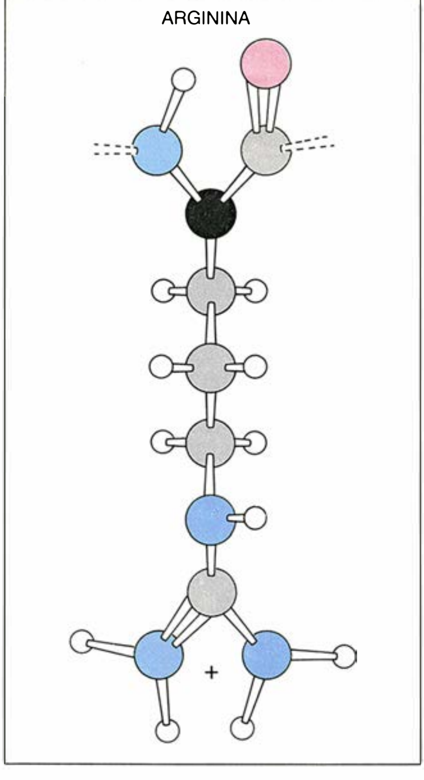
El estado de plegamiento se conoce bastante mejor que el estado desplegado. La mayor parte del armazón de la molécula nativa y compacta puede subdividirse en regiones con estructura secundaria, que consisten en distintos segmentos dotados de configuraciones características. (La secuencia aminoacídica constituye la estructura primaria.) Los elementos secundarios se distribuyen en tres categorías principales: hélices (esencialmente la hélice alfa), hebras beta o láminas beta, y los tramos de conexión de las hélices y las hebras. El armazón experimenta una extensión o estiramiento de las hebras beta; en las láminas beta, dos o más hebras, paralelas y antiparalelas, se disponen en fila.

Los elementos secundarios pueden combinarse entre sí para crear motivos o estructuras supersecundarias. El ensamblaje final de todos los elementos secundarios constituye la estructura terciaria. Se han identificado varias clases terciarias: la clase exclusiva de hélices alfa, la de sólo hebras beta y conjuntos determinados de combinaciones de hélices y hebras beta.

La presencia de distintos elementos secundarios plantea la posibilidad de que ciertos aminoácidos favorezcan la constitución de distribuciones secundarias específicas. Abundando en ello, algunos residuos aminoacídicos aparecen con mayor frecuencia en las formas helicoidales, mientras que otros se concentran en las láminas beta. Por otra parte, ninguna de estas correlaciones estadísticas o asimiladas es decisiva.

Otros hallazgos han mostrado que, como cabía esperar de las propiedades hidrófobas e hidrófilas de los aminoácidos, la tendencia del agua y de los residuos apolares a evitarse mutuamente condiciona la morfología resultante de la proteína. El interior de las proteínas nativas se halla esen-

FENILALANINA



3. DIFERENCIAS de forma, tamaño y polaridad en los aminoácidos, derivadas de las diferencias entre las cadenas laterales. En el aminoácido fenilalanina, por ejemplo, la cadena lateral es apolar y cíclica, mientras que la cadena lateral del aminoácido arginina es fuertemente polar y lineal.

cialmente exento de agua y contiene sobre todo aminoácidos hidrofóbicos apolares. Los residuos dotados de cargas formales residen casi de manera invariable en la superficie, en contacto con el agua. Los residuos o restos polares se hallarán en el exterior y en el interior, aunque en el segundo caso aparecen indefectiblemente unidos a otros grupos polares merced a enlaces de hidrógeno. Este enlace, en el que dos átomos (por lo común nitrógeno y oxígeno) se engarzan mediante un átomo de hidrógeno compartido, permite que los residuos permanezcan en el interior, lejos del agua.

De lo anterior se deduce que una regla del plegamiento puede ser aquella a tenor de la cual el contacto entre el agua y los aminoácidos hidrofóbicos se limitará al máximo. Esta regla general no basta, sin embargo, para predecir qué residuos específicos deben aparecer y en dónde. En concreto, no podemos distinguir qué fracción de residuos apolares persiste siempre en la superficie.

Otra regla general, deducida de análisis diferentes, impone limitaciones estéricas relevantes. El producto final debe empaquetarse de manera eficiente, es decir, debe ocuparse el espacio evitando solapamiento entre átomos vecinos. Algunos estudios estructurales han puesto de manifiesto cómo los aminoácidos de proteínas plegadas aparecen empaquetados de forma similar a como lo hacen otras moléculas orgánicas pequeñas. Mediante simulaciones por ordenador se confirma que en la proteína final (salvo unas pocas excepciones) las distancias de enlace entre átomos, así como los ángulos entre enlaces consecutivos, son idénticos a los observados en moléculas orgánicas más pequeñas.

Los investigadores coinciden en ciertos detalles estructurales de las proteínas plegadas, pero difieren en muchos otros aspectos. En particular, se dan numerosas discrepancias acerca de la naturaleza y cantidad de rutas de plegamiento.

Por un lado, tenemos la muy hipotética sugerencia según la cual una proteína recién sintetizada tantea todas las conformaciones posibles hasta hallar la estructura estable única de la forma nativa que le corresponde. Esta hipótesis supone que todas las conformaciones poseen idéntica probabilidad de adopción; pero ello no es verdad. A ese respecto, y como ya indicó tiempo atrás Cyrus Levinthal, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, ninguna molécula tendría la oportunidad, ni mucho menos, de verificar todas las conformaciones posibles en el tiempo que se requiere para plegar las proteínas: a lo sumo unos pocos segundos.

En el otro extremo se tiene la noción de que las proteínas siguen una ruta definida y exclusiva: cada molécula de una proteína dada se compacta a través de una secuencia específica de pasos. Considerando la gran cantidad de conformaciones que una molécula desplegada puede adoptar, esa idea parece también improbable. La hipótesis es comparable a la proposición de que todo el mundo entrará en Barcelona por la autovía de Castelldefels, sin atender a sus puntos de origen.

Una tercera sugerencia, que admite una o más rutas, supone que el efecto hidrofóbico es decisivo en un comienzo, mucho más importante que las interacciones electrostáticas o los condicionamientos de ocupación de espacio. Esta idea propone que las cadenas colapsan rápidamente acercándose a su densidad final a fin de substraer al agua los aminoácidos hidrofóbicos. A continuación, y en ese espacio limitadísimo, se reorganizan a gran velocidad, adoptando las estructuras secundaria y terciaria correctas. Desde una perspectiva mecanicística, esta imagen resulta inverosímil, habida cuenta de que las cadenas deberían desplegarse algo para permitir la movilidad necesaria. Con todo, este modelo dispone de apoyo experimental.

Pero la hipótesis mejor asentada

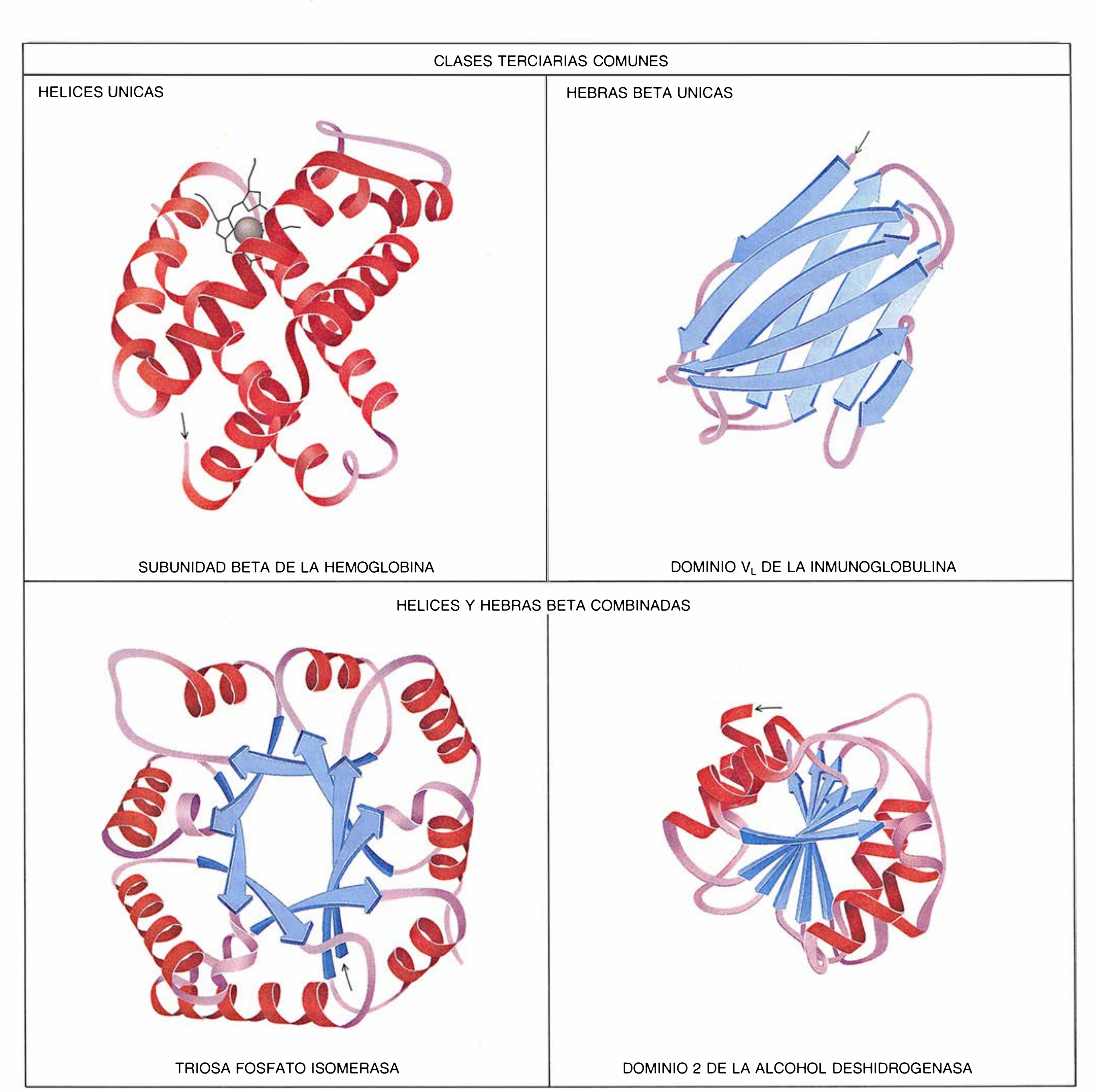
ESTRUCTURAS SECUNDARIAS COMUNES EN LAS PROTEINAS
(Conformaciones identificables adoptadas por segmentos del armazón)

defiende que la estructura secundaria se adopta antes de que la mayoría de las proteínas alcancen un estado de compactación importante. Las moléculas de una misma proteína pueden seguir distintas rutas para alcanzar el mismo fin; la selección de rutas es, sin embargo, limitada. Se han propuesto varios modelos para tales directrices, entre ellos el modelo marco de Robert L. Baldwin, de la Universidad de Stanford, y Peter S. Kim, quien trabaja ahora en el Instituto Whitehead de Investigación Biomédica.

En general, tales modelos proponen que las cadenas desplegadas adoptan en seguida estructuras secundarias en ciertos tramos marginalmente estables. Algunos de estos segmentos interaccionan entre sí. Si se empaquetan bien, o enlazan con presteza, se estabilizarán mutuamente, al menos por un tiempo. Las unidades así estabilizadas, o microdominios, impulsan la molécula hacia organizaciones estructurales superiores a través de la asociación con otros segmentos, mediante el contacto facilitado entre segmentos distanciados o bien por ambos efectos.

Este tipo de modelo conlleva la idea de que el efecto hidrofóbico, aunque intenso, es susceptible de agotarse de manera creciente. Parte de su energía se invierte en inducir la formación de elementos secundarios, mientras que el resto promueve la asociación de estos últimos elementos para dar la conformación terciaria.

Si conociéramos mejor las estructuras que se repiten en el camino hacia el estado nativo, avanzaríamos en el descifrado de las reglas del plegamiento. Por desgracia, es difícil observar formas intermedias, debido en parte al carácter altamente cooperativo del proceso de plegamiento. Las interacciones que promueven el plegamiento de una parte de la proteína lo instan también en otras zonas de la misma; perecen, pues, las formas intermedias. A pesar de ello y merced a técnicas ingeniosas, se han capturado o identifi-



cado algunas características de varias formas intermedias.

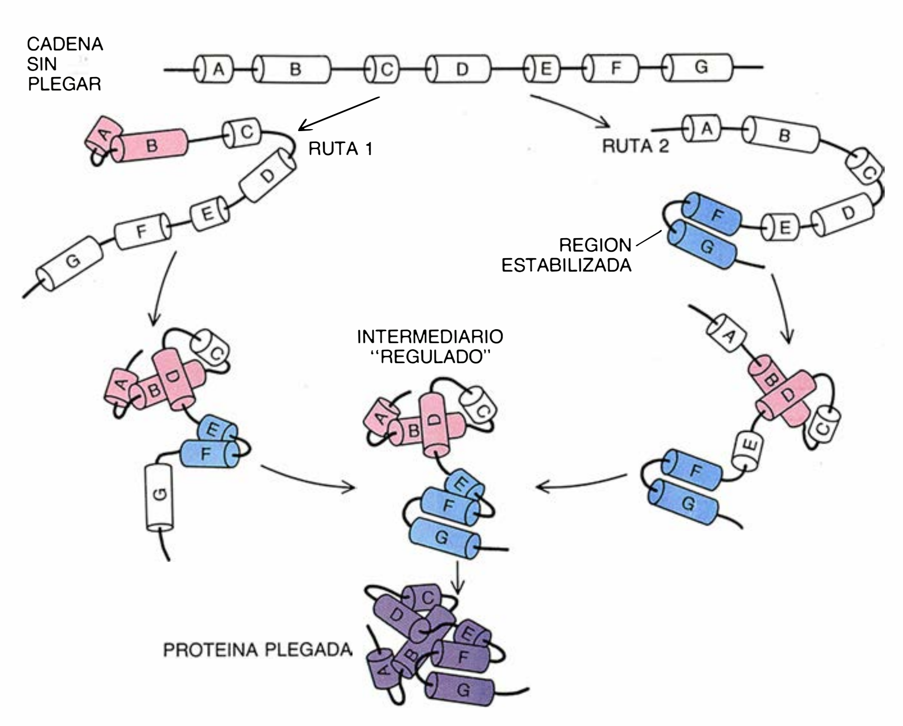
En este sentido, tenemos pruebas sólidas de que ciertas proteínas desarrollan un intermediario de tamaño mayor que la forma nativa de la proteína y poseen su estructura secundaria intacta. Oleg Ptitsyn, del Instituto soviético de Química de Proteínas en Putshino, denomina a esa estructura "glóbulo fundido". La existencia de semejante estructura resulta, de todas maneras, desconcertante.

Por ser mayor el volumen del glóbulo que el de la molécula nativa, habrá de contener una apreciable cantidad de agua; muchas cadenas laterales del glóbulo delatan, de hecho, su contacto con el agua. Ahora bien, si la función del efecto hidrofóbico es la de escurrir el agua, ¿cómo puede crearse un intermediario estable y observable bajo estas condiciones? ¿Cuál puede ser su estructura real? No hay respuesta todavía para tales cuestiones.

Thomas E. Creighton y sus colaboradores, del Laboratorio de Biología Molecular del Consejo de Investigación Médica en Cambridge, han estudiado en otros experimentos el plegamiento del inhibidor proteico pancreático de la tripsina (IPT); lo mismo que muchas otras proteínas, el inhibidor tiende enlaces disulfuro internos conforme se va plegando. Un enlace disulfuro es una unión azufre-azufre (S-S) entre las cadenas laterales de dos residuos aminoacídicos de cisteína. Creighton y sus colaboradores desplegaron el producto nativo para iniciar, a continuación, la reacción de plegamiento, deteniéndola a intervalos prefijados. Gracias a ello capturaron intermediarios susceptibles de identificación por enlaces disulfuro específicos. Se pudo, así, establecer la primera ruta de plegamiento.

No conocemos todavía los pormenores de las estructuras de esos intermediarios. Lo que no impide que la experimentación haya revelado que el plegamiento no transcurre necesariamente por un camino único y directo. A medida que se va plegando el inhibidor pancreático de la tripsina, se forman, para desaparecer de inmediato, intermediarios que poseen enlaces disulfuro inexistentes en la molécula final. Diríase que algunas de las partes de la molécula se comportan como el anfitrión que presenta a dos extraños dotados de gustos similares y, luego, cuando ambos han entrado en conversación, los deja para mezclarse con otros invitados.

Al estudiar un supuesto intermediario de la misma proteína IPT, Kim y Terrence G. Oas, del mismo Instituto Whitehead, han hallado pruebas de lo siguiente: aunque algunas partes de la molécula se asocian de manera transitoria, otras forman probablemente estructuras que permanecen estables. Basados en el trabajo de Creighton, estos investigadores sabían que dos tramos concretos de la molécula quedaban conectados por un enlace disulfuro perdurable en el inicio del proceso de plegamiento. Y se preguntaron si la estructura supersecundaria de la región circundante del enlace se formaba también en una época precoz y persistía.



4. MODELO PLAUSIBLE de cómo se pliegan las proteínas; permite aceptar diversas rutas energéticamente favorables; aquí aparecen sólo dos. Inicialmente la cadena forma regiones con estructura inestable (*cilindros blancos*). Ciertas regiones se estabilizan por asociación (*color*). Estos microdominios estabilizados facilitan la asociación de otras regiones y así la molécula progresa hacia una organización estructural superior. Andando el tiempo, todas las rutas conducen a uno o más intermediarios "regulados", los cuales dan lugar a una idéntica conformación final de la proteína.

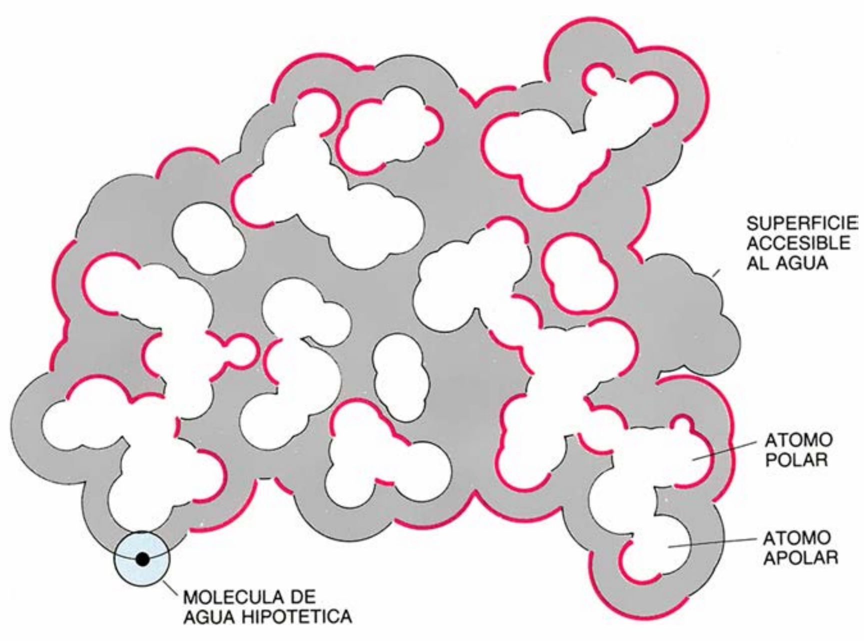
Para salir de dudas, se procedió a la síntesis química de dos fragmentos distintos de la proteína. Cada uno contenía una cisteína del par que interviene en el enlace disulfuro estable. Ninguno de los dos péptidos sintetizados mostraba estructura propia discernible; ahora bien, al juntarse en disolución, adoptaban una conformación muy próxima a la observada en la cadena nativa.

Este hallazgo confirma que pueden formarse muy pronto estructuras que mimetizan las nativas; sugiere, además, que ciertas partes de la molécula pueden revestir mayor importancia que otras en la inducción del plegamiento. El resultado indica, asimismo, que las interacciones entre segmentos de la proteína carentes, en apariencia, de estructura pueden mediar en el desarrollo de la estructura secundaria.

Se están estudiando los intermediarios con otro ingenioso procedimiento que aprovecha el gran número de enlaces internos de hidrógeno que se encuentran en todas las proteínas nativas. Se comienza por cambiar los átomos de hidrógeno normales unidos al nitrógeno implicado en los enlaces peptídicos por un átomo afín —el deuterio, isótopo del hidrógeno (D)—, depositando las cadenas en agua pesada, D_2O. A continuación se procede a iniciar el plegamiento.

Conforme avanza el plegamiento, aquellos que hubiesen sido enlaces de hidrógeno se convierten en enlaces de "deuterio" (N—D—O). En un momento dado, el agua normal (H_2O) se substituye por agua pesada. Cuando esto acontece, los átomos de deuterio desprotegidos por no hallarse constituyendo enlaces de deuterio intercambian lugares con el hidrógeno del agua. El plegamiento prosigue entonces hasta su culminación.

La identificación de las regiones de la molécula compactada que contienen deuterio protegido nos permite establecer qué partes se pliegan antes que otras. Además, mediante serie de ensayos en los que se alarga progresivamente el tiempo de transferencia



5. SUPERFICIE ACCESIBLE AL AGUA, noción que nos permite estimar la fuerza ejercida por el agua sobre una molécula en disolución acuosa. La superficie accesible (*contorno exterior*) —mostrada en la forma de una fina sección transversal de la proteína— es definida por el trazo descrito desde el centro de una molécula de agua imaginaria a medida que ésta va rozando los átomos externos de la proteína. La superficie se divide en dos partes, atrayente (*trazo coloreado*) y repelente de agua (*trazo negro*), según los átomos sean polares o apolares. Una región amplia que repele agua corresponde a una fuerza de compresión importante; a una dilatada superficie atrayente del agua le corresponde una intensa fuerza expansiva. La fuerza de compresión predomina con el avance del pliegue.

UN PROCEDIMIENTO PARA CAPTURAR INTERMEDIARIOS PLEGADOS

1. SELECCION DE UNA CADENA ESTIRADA

2. INTERCAMBIO DE HIDROGENO POR DEUTERIO (D) MEDIANTE INCUBACION EN D_2O

D_2O

3. INICIACION DEL PLEGAMIENTO

La unión protege a los átomos de deuterio de intercambios ulteriores.

4. INTERCAMBIO DE ATOMOS DE DEUTERIO DESPROTEGIDOS CON HIDROGENO; PERMITE QUE EL PLEGAMIENTO PROGRESE

H_2O

Las posiciones de los átomos de deuterio protegidos evidencian qué partes de la proteína se pliegan inicialmente.

a agua, obtendremos, posiblemente, el orden de formación de los distintos intermediarios.

Merced a esta técnica, Heinrich Roder, de la Universidad de Pennsylvania, demostró que un primer paso en el plegamiento del citocromo *c* consistía en la asociación de dos hélices situadas en los extremos opuestos de su cadena. Baldwin y su colaborador en Stanford Jayart B. Udgaonkar, estudiando la ribonucleasa, mostraron que la porción de lámina beta de esta enzima —situada en medio de la molécula— se forma en un momento temprano. Estos hallazgos, aunque por sí solos no permiten deducir aún las reglas generales del plegamiento, ponen de manifiesto la capacidad del método para identificar los mecanismos que regulan dicho proceso.

La experimentación no se ciñe, en absoluto, al estudio de los intermediarios. Varios investigadores están atacando el problema del plegamiento desde técnicas de ingeniería genética con el propósito de examinar los efectos debidos a las substituciones de aminoácidos, de sus deleciones e inserciones, lo mismo en la estructura de las proteínas que en el proceso del plegamiento.

Los resultados experimentales ya obtenidos, amén de la simulación informática de las substituciones aminoacídicas, indican que el reemplazo de uno o incluso de varios residuos no suele entorpecer la adquisición de la arquitectura apropiada. En otras palabras, la respuesta al problema del plegamiento no descansa tanto en un manojo de aminoácidos esenciales cuanto en aspectos más amplios de la secuencia aminoacídica. En cambio, la responsabilidad de la actividad de las proteínas podría correr a cargo de una pequeña porción de la molécula entera. Substituciones aminoacídicas puntuales en las regiones activas condicionan drásticamente el comportamiento biológico, aun cuando la estructura global de la proteína parezca inalterada.

En experimentos de otro signo, Siew Peng Ho y William F. DeGrado, de la compañía DuPont, e independientemente, Jane S. y David C. Richardson, de la Universidad de Duke, se hallan empeñados en la creación de proteínas artificiales que habrán de plegarse en conformaciones prefijadas. Sirve ello para someter a prueba diversas hipótesis, como la que sostiene que ciertas secuencias de aminoácidos hidrofóbicos e hidrofílicos tienden a formar hélices alfa, para agruparse después en

conjuntos helicoidales que se interdigitan (un manojo de hélices).

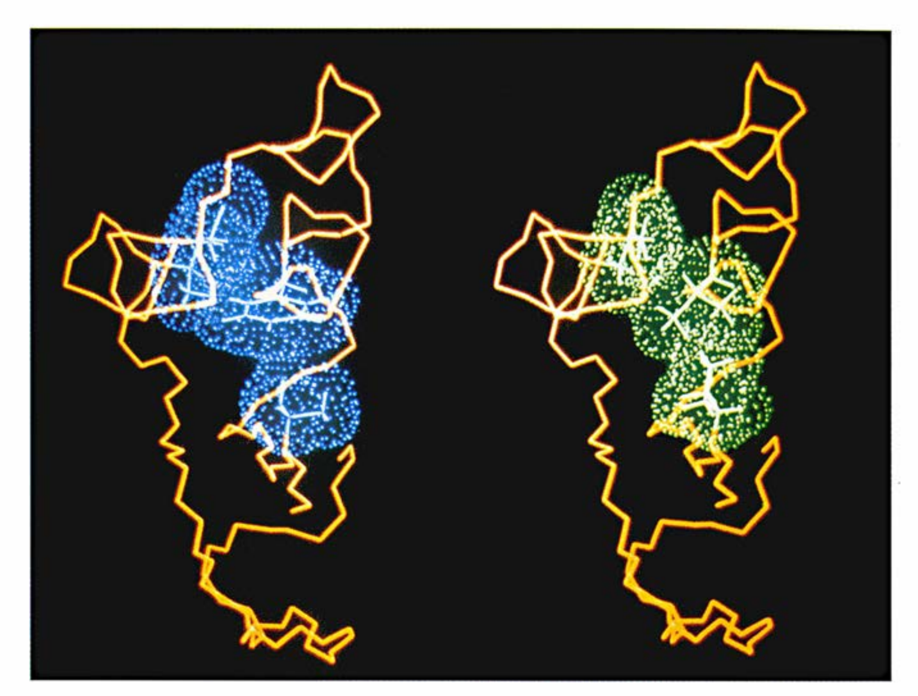
Han conseguido ya proteínas de arquitectura específica. Con todo, la ciencia está aún lejos de predecir la estructura terciaria de una proteína cualquiera basándose exclusivamente en la secuencia de sus aminoácidos y sin otra información suplementaria sobre la substancia.

Las iniciativas teóricas han sido un complemento del trabajo experimental. En ese marco, la morfología de una proteína plegada podría, en principio, determinarse a través de una expresión matemática: la función de la energía potencial. Se introduce en el ordenador un conjunto de valores numéricos que describen las fuerzas y otros aspectos de las atracciones entre todos los pares de átomos de la cadena proteica. El ordenador realiza seguidamente el ajuste de las coordenadas atómicas, de manera que el balance energético alcance un mínimo —es decir, hasta que cualquier ajuste ulterior se traduzca en un incremento de energía. (Se admite que las estructuras finales de las proteínas representan estados energéticos mínimos.)

En la función entran diversos factores: la repercusión de la longitud, el estiramiento y el giro de los enlaces en la energía, así como la intensidad de las interacciones electrostáticas, enlaces de hidrógeno y fuerzas de van der Waals. Este enfoque ha resultado provechoso para la confirmación o refinamiento de modelos estructurales establecidos por vía experimental.

Aquellas moléculas cuyas estructuras finales son un completo enigma plantean problemas. Los valores introducidos en las ecuaciones pueden estar sujetos a grandes márgenes de error. Además, no hay forma de averiguar si la energía mínima resultante representa un valor absoluto o se trata de un estado intermedio de energía reducida. La teoría se ve incapaz de orientar sobre cuál debe ser el valor mínimo absoluto.

Martin Karplus, de la Universidad de Harvard, ha optado, en un intento semejante, por un camino que, con el tiempo, podría desembocar en la filmación del plegamiento de las proteínas; él aplica las leyes de Newton sobre la cinética a los átomos de una proteína. Las fuerzas sobre los átomos de una molécula en un estado determinado se infieren de la función de la energía potencial. A partir de ahí, el ordenador calcula la aceleración de cada átomo y su desplazamiento al término de un intervalo brevísimo.



6. CONFORMACION de un pliegue en el interior de una crambrina (*izquierda*), proteína que se representa como una cadena de carbonos alfa (*naranja*). Su configuración depende de la compacidad del empaquetamiento de los cinco aminoácidos apolares (*esferas azules*). Esta configuración no se altera en un "mutante" (*derecha*) simulado por ordenador, ni siquiera cuando cuatro de los cinco aminoácidos son substituidos por otros. Son viables muchas combinaciones de aminoácidos, a condición de que los análogos se asemejen a los originales en morfología y volumen. El conocer cómo los aminoácidos se van empaquetando podría llevarnos a la predicción de la forma de una proteína.

La repetición del proceso a lo largo de un período limitado por la potencia disponible de ordenador permite que el programa revele los movimientos de cada átomo. Se está logrando, pues, identificar los efectos que pequeñas mutaciones ejercen en la estabilidad de las proteínas y en su comportamiento dinámico. Pero la limitada capacidad de los ordenadores impide ir más allá de unos pocos nanosegundos de la vida de una molécula, intervalo demasiado corto para que pueda ofrecernos algo de interés sobre el plegamiento proteico.

El trabajo teórico basado en la función de la energía potencial, pese a sus limitaciones, resulta muy prometedor. Los estudios basados en dicha función deben asignar la importancia relativa de cada una de las fuerzas que actúan sobre una proteína: interacciones electrostáticas o repulsiones de van der Waals, por ejemplo. Resulta decisivo delimitar las influencias, ya que una proteína plegada es sólo marginalmente más estable que en estado desplegado. De donde se infiere que los factores responsables de las diferencias deben ser, con toda probabilidad, muy sutiles. (El reducido diferencial energético entre los estados estable e inestable podría reflejar la necesidad que presente una célula de inactivar proteínas con celeridad a medida que vaya requiriendo cambios.)

A largo plazo, el cálculo basado en la función de la energía potencial bien podría predecir la estructuración terciaria de cualquier proteína a partir de su secuencia de aminoácidos. En el ínterin han ido saliendo a la luz otras ideas menos fundamentales, aunque útiles, sobre el problema del plegamiento.

Cualquier solución al rompecabezas deberá contemplar la manera de definir la fuerza ejercida por el agua sobre una molécula proteica. En principio, las aproximaciones al efecto hidrofóbico son, o pueden ser, integrables en la función de la energía potencial, pero cómo realizar mejor la estimación está muy poco claro.

El trabajo realizado en 1971 por Byungkook Lee, de la Universidad de Yale, dio pie a un método de análisis del efecto del agua. Lee desarrolló un algoritmo para determinar el área de una proteína de estructura conocida accesible al disolvente: la parte de la compleja superficie en contacto directo con el agua. Basándonos en hallazgos preliminares él y yo sugerimos que dicho algoritmo podría servir para abordar el plegamiento proteico.

Se divide el área accesible de una cadena proteica extendida (o de cualquier molécula elegida) de acuerdo con la naturaleza de los átomos que se hallen en dicha área. ¿Son éstos apolares y por consiguiente hidrofóbicos (esencialmente átomos de carbono y de azufre) o bien son polares y por tanto hidrofílicos (principalmente átomos de nitrógeno y de oxígeno)?

Conocemos la tensión superficial del agua en contacto con tales átomos. Tal y como Cyrus Chothia, del Consejo de Investigación Médica, ha señalado, dicha tensión constituye un índice directo de la fuerza ejercida por el disolvente sobre la molécula. La tensión superficial es elevada cuando el agua y las moléculas apolares se hallan en contacto, como ocurre si mezclamos aceite con agua, es decir, una fuerza intensa tiende a reducir el área de contacto entre el agua y el aceite y a estrujar la cadena proteica en un ovillo. La tensión se reduce cuando los átomos polares y el agua entran en contacto, y desaparece el efecto hidrofóbico.

El sumatorio de las áreas apolares accesibles de una cadena desplegada mide el efecto potencial hidrofóbico. En general, como cabría esperar de los análisis estructurales, la fuerza neta que actúa sobre la mayoría de cadenas proteicas es elevada y positiva, con tendencia a reducir el contacto con el disolvente y, por ende, a compactar la cadena.

Otros están examinando hasta qué punto los aspectos relacionados con el empaquetamiento dirigen el plegamiento. En una línea de trabajo, se han confeccionado listas de secuencias aminoacídicas de moléculas que vienen a adoptar la misma conformación tridimensional. Jay W. Ponder, de Yale, basándose en las propiedades estéricas de los aminoácidos en las moléculas —tales como la forma y el volumen—, ha generado otras listas de secuencias de aminoácidos que, en teoría, deberían adoptar las mismas configuraciones.

Hasta qué punto estas secuencias encajan realmente en las clases a las que han sido asignadas está pendiente de confirmación experimental. Con todo, muchas de ellas sí parecen hacerlo. Este hallazgo, unido a la profunda influencia del agua, nos faculta para pensar que el efecto hidrofóbico y las condiciones estéricas, por sí mismas, determinan el modo de plegarse de una proteína.

Aceptemos que sea así. ¿Cuál sería, entonces, la función de las interacciones electrostáticas de corto y largo alcance en el plegamiento proteico? Sin la menor duda, la contribución de tales interacciones variará según la proteína de que se trate. Muchas de ellas pueden tolerar substanciales modificaciones de las cargas formales sin alterar significativamente la estructura global definitiva. Podría suceder que las interacciones electrostáticas fuesen a menudo más importantes para estabilizar la configuración final que para constituirla en un comienzo.

Establecer si la anterior posibilidad es correcta requiere la capacidad de calibrar la fuerza de las interacciones electrostáticas. Con todo, las matemáticas se complican por el hecho de que los átomos de una proteína que se pliega están a menudo separados por agua; puede ésta amortiguar las atracciones lejanas y las repulsiones, y hacerlo de manera difícil de evaluar sin contar con una información estructural pormenorizada. Y, a medida que la proteína se pliega, la distancia entre átomos cambia constantemente, circunstancia que introduce una complejidad adicional.

Los efectos precisos de las interacciones hidrofóbicas, estéricas y electrostáticas permanecen, pues, ignorados. A pesar de todo, la investigación sobre el plegamiento proteico avanza mucho más aprisa hoy que en el pasado. Quienes nos hallamos metidos de hoz y coz en este esfuerzo no podemos todavía "cantar victoria", aunque nos acercamos aceleradamente hacia ello. Progreso que es, en sí mismo, alentador; lo es también saber que la solución del plegamiento aclarará un tema de riguroso interés científico y encontrará aplicación inmediata en la biotecnología.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

PROTEIN FOLDING. Charis Ghélis y Jeannine Yon. Academic Press, 1982.

SPECIFIC INTERMEDIATES IN THE FOLDING REACTIONS OF SMALL PROTEINS AND THE MECHANISM OF PROTEIN FOLDING. Peter S. Kim y Robert L. Baldwin en *Annual Review of Biochemistry*, vol. 51, págs. 459-489; 1982.

PROTEINS, STRUCTURES AND MOLECULAR PROPERTIES. T. E. Creighton. W. H. Freeman and Company, 1983.

FOLDING AND ASSOCIATION OF PROTEINS. Rainer Jaenicke en *Progress in Biophysics & Molecular Biology*, vol. 49, n.º 1, págs. 117-237; 1987.

PROTEIN FOLDING: DECIPHERING THE SECOND HALF OF THE GENETIC CODE. L. M. Gierasch y J. King. American Association for the Advancement of Science, 1990.

Ciencia y sociedad

Saturno blanco

En septiembre del año pasado, astrónomos aficionados descubrieron la Gran Mancha Blanca, una violenta y descomunal tormenta en Saturno. De entonces acá ha ido creciendo y se ha propagado hasta cubrir casi un hemisferio completo del planeta. A partir del 9 de noviembre, los astrónomos dirigieron la cámara de campo ancho del *Telescopio Espacial Hubble* hacia Saturno, para observar con mayor definición el fenómeno.

Imágenes anteriores recogidas por el *Hubble* habían permitido establecer que el procesamiento de las mismas en el ordenador capacitaba al telescopio para lograr la resolución buscada de una décima de segundo de arco, en imágenes brillantes y de gran contraste. Muchos astrónomos se encontraron con la agradable sorpresa de comprobar que las técnicas informáticas funcionaban con idéntica eficacia para objetos del tamaño de Saturno. La imagen resultante muestra los primeros momentos de una transformación en el planeta, cuyos rastros turbulentos se asemejan a los que las sondas *Voyager* nos han traído de Júpiter.

El color blanco de la mancha se debe, presumiblemente, a nubes altas de cristales de amoniaco. Ignoramos, sin embargo, la causa de los movimientos atmosféricos verticales que dan origen a las nubes. Manchas parecidas, aunque menores, habían aparecido antes, con intervalos de 27 a 30 años. Se atribuían a fenómenos estacionales ligados a los veintinueve años y medio que dura la órbita del planeta alrededor del Sol.

La fotografía en falso color que se acompaña se ha obtenido combinando dos imágenes, en el azul y en el infrarrojo. El color azul indica nubes de baja altitud; el rojo, nubes de alta altitud. El telescopio *Hubble* ha sacado más de 400 imágenes, que se utilizarán para crear una película donde contemplaremos el comportamiento, a lo largo del tiempo, de la Gran Mancha Blanca.

1. El Hubble pesca una gran mancha blanca.

Tiempos duros para la NASA

De nuevo el organismo norteamericano dedicado a la investigación espacial, la NASA, ha tenido que enfrentarse con el fracaso parcial de una misión. Una vez más, los astrónomos han tenido que conformarse con el éxito recortado de un ensayo. Hablamos de *Astro-1*, conjunto de cuatro telescopios que transformaron la bodega de la lanzadera *Columbia* en un refinado observatorio.

Aunque se realizaron más de la mitad de las observaciones de los 250 objetos cósmicos previstas, la misión se vio frustrada, al menos en parte, por la reducción del tiempo de vuelo de la astronave y por indomables problemas técnicos del equipo. Existe, pues, el temor de que la NASA cancele el laboratorio *Astro*, cuyo costo se cifra en 150 millones de dólares, tras este primer escarceo.

Entraba dentro de lo posible que surgieran problemas en el sistema de posicionado de los instrumentos y fallara alguna terminal de control de la lanzadera. El laboratorio *Astro* estaba destinado a convertirse en plataforma reutilizable para seis misiones, como mínimo. Arthur F. Davidsen, de la Universidad Johns Hopkins, responsable de uno de los telescopios, comenta sonriente que "la próxima misión irá como la seda". Pero con la misma serenidad apostilla: "aunque quizá no haya una próxima".

Los astrónomos no ocultan su malestar: los datos recabados son prometedores e importantes. Recuérdese que el *Astro* está compuesto por cuatro instrumentos sensibles a los rayos X y a la radiación ultravioleta, formas energéticas de la radiación electromagnética emitida por los objetos celestes muy calientes o por los que sufren violentas perturbaciones.

El telescopio de rayos X de banda ancha (*BBXRT*), uno de los instrumentos, no vio afectada su operación por los problemas de los ordenadores de la lanzadera. A él se deben observaciones de gas caliente en una galaxia elíptica gigante, que muestran que el objeto sextuplica la materia que las observaciones en el espectro visible le atribuían. Lo que corrobora otros indicios de que el universo está dominado por la "materia oscura", que no reside en las estrellas o en las nubes de gas brillante.

Las medidas de rayos X que *Astro* ha realizado de los espectros de los núcleos activos de galaxias, considerados los hermanos pequeños de los

cuásares, parecen mostrar la señal térmica de discos de materia caliente en rotación, posiblemente gas a punto de ser engullido por un agujero negro. El telescopio de rayos X también obtuvo valiosos datos, todavía por estudiar, sobre la estructura y la composición de objetos que abarcan desde distantes grupos de galaxias hasta otros cercanos, como las exóticas estrellas dobles, en las que una enana blanca fagocita a su compañera de tipo solar.

Los instrumentos ultravioleta de *Astro* escudriñaron los objetos observados por el *BBXRT*; lo hacen a longitudes de onda algo menos energéticas. El telescopio ultravioleta Hopkins (*HUT*), el mayor de los instalados a bordo, apuntó hacia cuásares y núcleos activos de galaxias, a la caza de los picos de brillo que se espera encontrar en las longitudes de onda ultravioletas. El acoplamiento del espectro ultravioleta con el de rayos X nos aclarará la naturaleza de tan enigmáticos objetos. El *HUT* buscaba también neutrinos con masa, uno de los presumibles constituyentes de la materia oscura del universo.

WUPPE abrevia el nombre del fotopolarímetro ultravioleta Wisconsin, dispositivo encargado de detectar radiación ultravioleta polarizada por la interacción con gas ionizado o con partículas de polvo interestelar. Los primeros indicios de que el polvo causa muy poca polarización encajan en la hipótesis que lo imagina de grafito. El *WUPPE* facilitará el conocimiento de otros objetos polarizados; enanas blancas magnéticas y estrellas supergigantes azules.

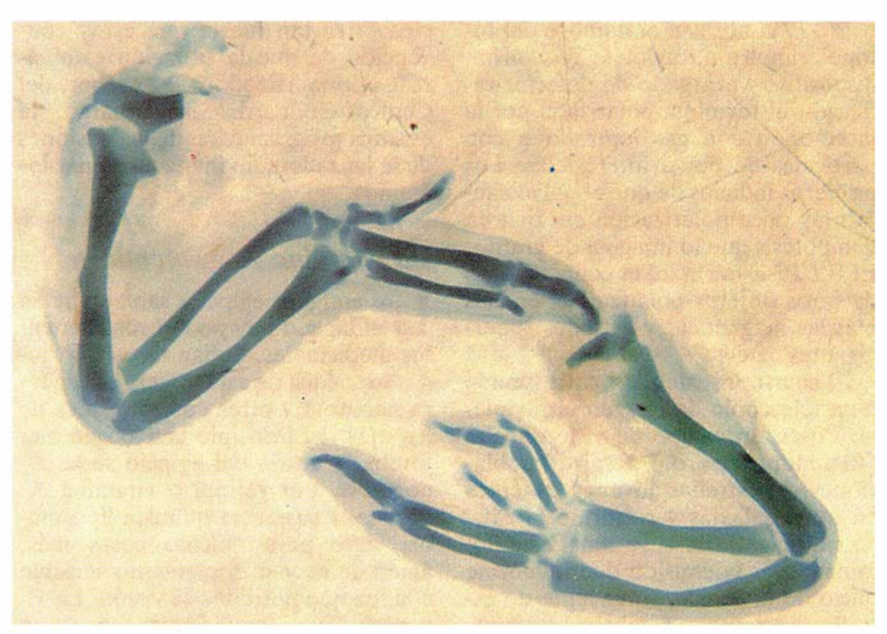
El cuarto instrumento corresponde a un telescopio de imagen ultravioleta. Posee un campo de visión ancho (40 minutos de arco). Registró poblaciones de estrellas jóvenes calientes en otras galaxias y confirmó la existencia de galaxias cuya señal está dominada por la emisión de un enorme pulso de radiación procedente de estrellas nacientes. También se observaron esos objetos en cúmulos globulares de estrellas fijas, cuyo aspecto ayudará a determinar la edad de estos antiguos conglomerados estelares.

Es frustrante la perspectiva de que se corten las alas de *Astro*. Algunos no han perdido la esperanza. "La ciencia es tan fuerte que estoy convencido de que la situación cambiará", afirma Theodore P. Stecher, del Centro Goddard. Sin embargo, la errática programación de las misiones de la lanzadera no invita a serenar los ánimos.

La vitamina A y su cohorte

Los antiguos egipcios sabían que en el hígado hay poderosos elementos medicinales. Solían tratar con jugos extraídos de esta víscera la ceguera nocturna y otras enfermedades de los ojos. El principio activo que mejoraba la visión del egipcio se le conoce hoy por retinol o vitamina A. Pero esta sustancia química liposoluble sirve para muchas cosas más, amén de excitar el pigmento sensible a la luz que posibilita la visión. La vitamina A y su familia pertenecen a un grupo escogido de sistemas maestros de control que orquestan la formación y el funcionamiento de la célula y desempeñan un papel clave en protegerla contra el cáncer.

Para George Wolf, de la Universidad de California en Berkeley, "la vi-



2. *EL ACIDO RETINOICO influye en el crecimiento, según se patentiza con estas dos alas de embrión de pollo. El ala normal* (a la izquierda) *tiene tres dedos. En la otra* (derecha), *perteneciente a un embrión tratado con ácido retinoico, se ha desarrollado un par de dedos extra. Foto: Gregor Eichele.*

tamina A ha pasado a ocupar una posición central en la biología". Efectivamente, uno de sus productos, el ácido retinoico, interviene en la diferenciación celular en los embriones. Un error genético que afecta a su acción desemboca en una forma de leucemia. Y otras variantes químicas de la vitamina A, los retinoides, son poderosas— y peligrosas— drogas: una de ellas protege contra ciertos cánceres, pero también es causa de defectos de nacimiento.

El cuerpo extrae la vitamina A de los alimentos, bien sea directamente o bien fragmentando betacarotenos, pigmentos de color anaranjado que dan ese tono a las zanahorias. En los países industrializados, es casi desconocida la deficiencia de vitamina A, pero, según una estimación, 500.000 niños pierden cada año la vista en los países pobres por falta de esta vitamina. Y muchos hasta mueren. La deficiencia de vitamina A impide el crecimiento y aumenta la sensibilidad a las infecciones.

La vitamina A ejerce su poder protector actuando en las células que tapizan la piel, la córnea, los pulmones y el tracto digestivo. Las anomalías cutáneas, algunas de las cuales semejan alteraciones cancerosas, fueron los primeros entre los muchos efectos de la deficiencia de vitamina A que se observaron en humanos. Ya a comienzos de nuestro siglo los investigadores se percataron de que una carencia grave de esta vitamina origina en las ratas cáncer de estómago. Intrigados, los investigadores han experimentado con retinoides sintéticos. Uno de ellos, el ácido *trans*-retinoico, se emplea para el tratamiento del acné grave.

Otros retinoides y el betacaroteno suprimen las alteraciones malignas en células desarrolladas en cultivo y en animales de experimentación. Richard C. Moon, del Instituto de Tecnología de Illinois, ha demostrado que un retinoide sintético llamado 4-HPR suprime los cánceres de mama en las ratas.

Los datos epidemiológicos proporcionan ulteriores pruebas de que hay un nexo entre los retinoides y el cáncer. Muchos investigadores han confirmado que quienes contraen la enfermedad es probable que tengan bajos niveles de retinol en la sangre y que consuman menos betacaroteno del promedio conveniente.

En los países desarrollados la gente consume ya más vitamina A de la que se necesita, por lo que los esfuerzos investigadores se han enfocado sobre el betacaroteno. El único incomodo que causa éste, si se toma en exceso, es el de poner amarillenta la piel.

El efecto antioxidante del betacaroteno fue puesto en claro hace poco en los resultados preliminares de un estudio sobre los efectos de la aspirina en los trastornos cardíacos. Según Charles H. Hennekens, de la Facultad de Medicina de Harvard, un subgrupo de los participantes que tomaron betacaroteno tuvieron menor incidencia de ataques combinados de apoplejía y de corazón, por la posible razón de que el betacaroteno inhibió la oxidación de los depósitos de colesterol.

Los resultados de un estudio de cinco años de duración sobre la posible actividad anticancerosa del betacaroteno, dados a conocer por un equipo dirigido por E. Robert Greenberg, de la facultad de medicina de Darmouth, fueron, sin embargo, decepcionantes. No pudieron demostrar ningún efecto protector contra el cáncer de piel en sujetos que habían padecido anteriormente el mal. A pesar de ello, Hennekens y otros especialistas creen que, mediante otras pruebas todavía en curso, podrá llegar a demostrarse que el betacaroteno previene contra otros cánceres.

Resultados más alentadores dio recientemente un estudio clínico en el que se empleó el retinoide sintético isotretinoina. El estudio fue dirigido por Waun Ki Hong, oncólogo de la Universidad de Texas M. D. Observó que la isotretinoina impedía que se reprodujese el cáncer en la cabeza y en el cuello de individuos que ya lo habían padecido en esos sitios. "Pensamos que, mediante la regulación de los genes especializados en el crecimiento y en la diferenciación, los retinoides pueden restaurar la normalidad del desarrollo y de la diferenciación incluso en las células premalignas", dice Hong.

Gregor Eichele, del Baylor College de Houston, y Christina Thaller han elucidado la acción de estas substancias. Han demostrado que, a través del brote embrionario del ala, se va produciendo una gradual concentración de ácido retinoico que influye en el proceso evolutivo de las células. Alterando la concentración del ácido retinoico se hace que las alas desarrollen dedos supernumerarios. Esto indica que el ácido retinoico es un "morfógeno" que dirige el desarrollo normal. "El ácido retinoico impone un programa", explica Eichele: "es una molécula de instrucción".

Hace cuatro años Pierre Chambon, de la Universidad Louis Pasteur de Estrasburgo, y Ronald M. Evans, del Instituto Salk para Estudios Biológicos, hicieron cada uno por su cuenta un descubrimiento que supuso un gran adelanto hacia la explicación de cómo logran los retinoides sus poderosos efectos. Hallaron que los núcleos de las células contenían receptores —proteínas enlazantes— que modificaban la actividad de los genes cuando se les unía ácido retinoico (y probablemente otros retinoides).

Desde entonces, se han encontrado varios receptores de esos, aunque sus funciones exactas siguen siendo oscuras. "Sabemos que los receptores son afectados de distintos modos por varios retinoides", dice Chambon. Algunos regulan su propia velocidad de producción, mientras que otros tienen complejas interacciones con otros sistemas receptores que hay en el núcleo celular.

La presencia de estos receptores le sugiere, a Eichele, que los retinoides pueden formar parte de un sistema señalizador que controla la actividad de los genes. Entre los genes cuya actividad se sabe que viene condicionada por el enlazamiento del ácido retinoico está el que da origen a la laminina, proteína de la matriz que mantiene fijas las células. Eichele conjetura que el ácido retinoico podría afectar a la comunicación intercelular. Hay también receptores para el ácido retinoico fuera del núcleo, cuya función se desconoce.

Antonio Simeone y sus colegas, del Instituto Internacional de Genética y Biofísica de Nápoles, han demostrado que el aumento de concentración del ácido retinoico activa sucesivamente a los miembros de una clase de genes homeobox. Este podría ser un indicio importante para averiguar cómo actúa el ácido retinoico, opina Chambon. Se sabe que los genes de ese tipo desempeñan un papel clave en la especificación de las sendas epigenéticas (desarrollísticas), desde luego en los invertebrados y probablemente también en los mamíferos.

Cree Eichele que la importancia que el ácido retinoico tiene en el desarrollo puede explicar su capacidad para hacer que las células cancerosas reviertan a su carácter estable. El grupo de Hugues de Thé, del Instituto Pasteur de París, informó recientemente que es probable que en la leucemia promielocítica esté implicado un receptor nuclear del ácido retinoico. Descubrieron que en las células cancerosas el gen para un receptor de ácido retinoico aparece a menudo desplazado y fusionado con un gen antes desconocido, donde es probable que él origine un producto anómalo. Ese producto anómalo —sugiere de Thé— tal vez bloquee a los genes que normalmente son regulados por el ácido retinoico y desarbole el control.

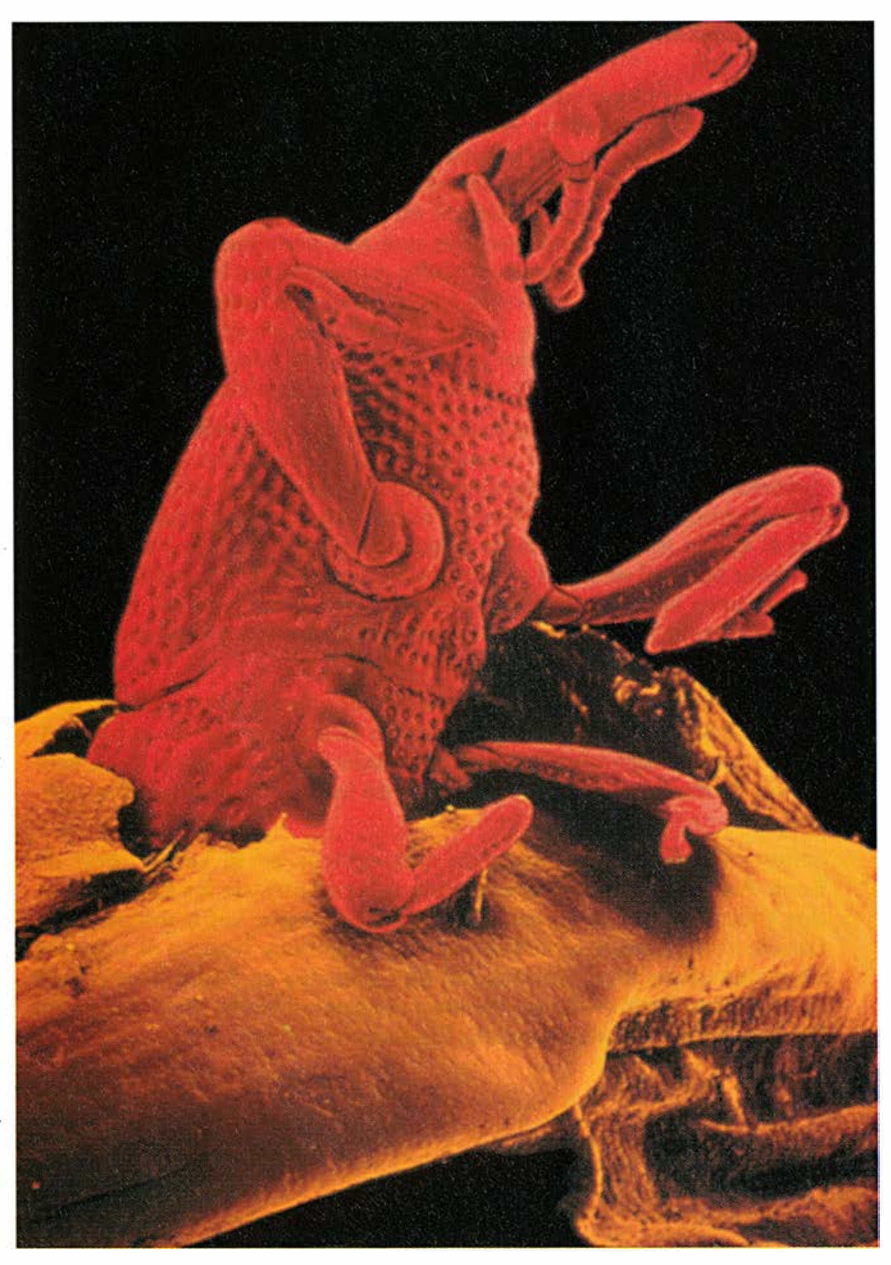
"Dado que el ácido retinoico interviene en la diferenciación y en el desarrollo de las células, no es demasiado sorprendente que ejerza su efecto sobre los tumores", recalca Chambon. "Si promueve u obstaculiza a otros factores reguladores, no lo sabemos."

Ciencia y empresa

Detector de insectos

Chhssss. ¿Ha oído eso? Crunch, munch, slorp... Es el ruido que hacen insectos y larvas mientras comen el corazón de las manzanas, excavan en la pulpa de los mangos o pudren los albaricoques. Toda clase de frutos —así como semillas, nueces y maderas— son platos de festín; la factura corre a cargo de todos los agricultores, conserveros, importadores y exportadores.

Hasta ahora sólo se ha podido detectar la plaga en frutos ya cosechados mediante el examen visual de muestras tomadas al azar. Los funcionarios escogen un fruto de cada caja presentada a los puntos de inspección y la seccionan para descubrir la presencia de larvas. La técnica de partir y buscar, lejos de resultar infalible, es, además, lenta. Se desperdicia una apreciable cantidad del producto en la comprobación rutinaria del estado sano de la partida. Los inspectores escudriñan también el grano en busca de insectos adultos, pero nadie puede adivinar a simple vista qué se alberga en el interior de un grano de trigo.



LOS ARTROPODOS patógenos diezman las cosechas cerealistas.

La solución podría estar en pegar el oído. Mucho se ha cavilado, desde los años veinte por lo menos, sobre la posibilidad de montar escuchas que denuncien la presencia de insectos. Pero hasta 1982 no se demostró que pudiera hacerse sobre una base práctica: correspondió el mérito a J. C. Webb, funcionario entonces del ministerio de agricultura estadounidense y hoy jubilado. Webb detectó la vibración producida por los insectos en la masticación y el movimiento por el interior de granos de trigo y de uva, bajo condiciones de laboratorio con equipos que valían miles de dólares.

La técnica está lista, eso afirma, para salir del laboratorio al mercado. Con su colaborador Robert Hickling, ingeniero del Centro Nacional de Acústica Física de la Universidad de Mississippi, ha desarrollado un dispositivo de escucha, un sensor, cuya fabricación costará muy pocos dólares. No sueltan prenda sobre la naturaleza del sistema hasta que se les conceda la patente. Hickling adelanta que el sensor se concentra en una banda de bajas frecuencias, entre 800 y 900 hertz; las más altas quedan atenuadas por las fibras del fruto y el grano. Entre 10 y 15 segundos después, un ordenador examina las lecturas y determina si hay o no plaga.

A muchos interesa ese desarrollo de sensores acústicos prácticos. Las empresas cerealistas demandan que alquien solucione de una vez los problemas de silos y almacenes. Sólo en los Estados Unidos la décima parte del grano almacenado se pierde cada año; en otras zonas del mundo se estropea del 20 al 50 por ciento de la cosecha.

La oportunidad del dispositivo no necesita, pues, ponderación alguna. Quien más quien menos, cada país tiene que soportar su plaga endémica que podría causar una devastación si se introdujera en otro de clima similar. Japón, por ejemplo, que adquiere más de 100 millones de dólares de uvas frescas de Florida cada año, está exento del insecto que ataca los racimos en ese estado. Pero no se fía e impone estrictas leyes de cuarentena, como lo hacen otros países en la esperanza de evitar el patógeno medi-

terráneo, el australiano de Queensland, el malayo y muchos más.

Agujero o rosquilla

Los fabricantes de semiconductores han empezado a pensar en las técnicas litográficas que se necesitarán en la próxima generación de pastillas de memoria, capaces de almacenar 256 megabits o incluso un gigabit de información. El grabador de los transistores y otras miniaturas forzará la fotolitografía, su principal técnica de fabricación, hasta el límite de sus posibilidades.

Las voces que proclamaban el fallecimiento inminente de la fotolitografía han vuelto a equivocarse. Aunque esta vez los fabricantes de pastillas, que tendrán que maravillárselas para grabar circuitos de una décima de micrometro de anchura sobre obleas de silicio, pueden verse obligados a considerar otras formas de radiación. Mencionemos dos técnicas en particular: la litografía mediante haces de electrones y la litografía mediante rayos X.

En línea de principio, la litografía mediante haces de electrones se halla en desventaja ante la litografía por rayos X. Las técnicas actuales de litografía y fotolitografía por rayos X hacen uso de máscaras a través de las cuales se proyecta sobre la oblea de silicio una imagen de la circuitería entera de la pastilla. Se obtiene así un proceso cuya velocidad multiplica por cincuenta la celeridad de la litografía por haces de electrones, habida cuenta de que éstos han de guiarse mientras se imprime, línea a línea, la configuración del circuito sobre la oblea. El proceso de escritura directa, nombre que recibe, se emplea todavía para dibujar circuitos sobre las máscaras y fabricar pastillas especiales.

Los laboratorios AT&T Bell podrían haber creado una máscara para los haces de electrones capacitada para acercar la técnica a la velocidad de la litografía por rayos X. Sus investigadores han conseguido eliminar uno de los principales inconvenientes del uso de electrones para proyectar una imagen de circuito a través de una máscara: el "problema de la rosquilla".

Antaño, los ensayos de máscaras para haces de electrones empleaban clichés de silicio muy espesos, de grosor suficiente para bloquear la radiación de fondo e impresionar sólo las líneas del circuito. Pero los fabricantes que querían una máscara para impedir la impresión de una zona encerrada —equivalente al agujero de una rosquilla— no podían unir el agujero al resto de la máscara. Aunque los proyectistas de circuitos quizá no tengan nunca que imprimir una rosquilla, el problema de cartografiar espacios encerrados es común.

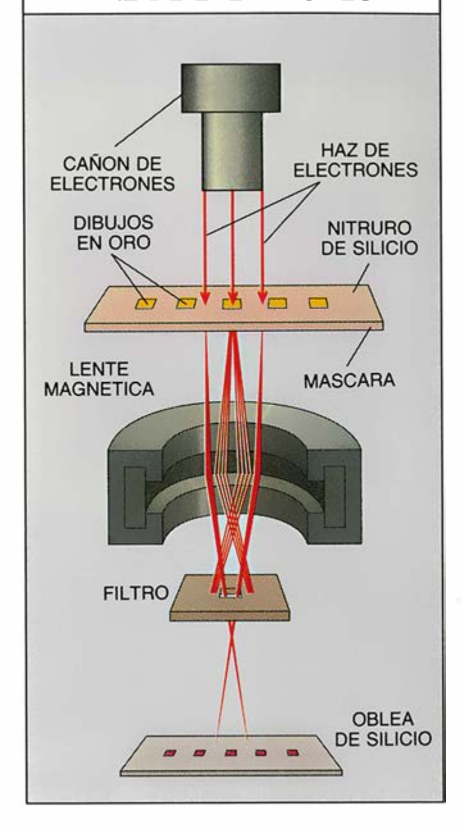
Las rosquillas no constituyen ningún problema en la litografía de rayos X y en la fotolitografía, porque la sección opaca de la máscara es un delgado dibujo de metal que se sitúa encima de un substrato transmisor (vidrio o cuarzo para fotolitografía, silicio para rayos X). El agujero de la rosquilla descansa sobre el substrato; el metal absorbe entonces los fotones de luz o rayos X y la radiación atraviesa la parte transparente de la máscara para impresionar la oblea.

Este procedimiento no da resultado con haces de electrones; por culpa de su elevada energía, penetrarían a través del metal de las máscaras habituales. Para absorber los electrones, las zonas de metal de la máscara tendrían que tener al menos 25 micrometros de espesor y descansar sobre un substrato de silicio de no más de un micrometro; lo que viene a ser una casa sobre una capa finísima de hielo.

La máscara de los laboratorios Bell evita ese problema mostrándose completamente transparente a los electrones. Ideada por los físicos Steven D. Berger y J. Murray Gibson, consta de una película de nitruro de silicio de medio micrometro de espesor, a cuyo través se propagan los electrones. El dibujo del circuito sobre la máscara se realiza mediante oro, tungsteno u otro metal de número atómico más alto que el del silicio. Laz zonas metálicas no impiden el paso de los electrones; antes bien, su mayor carga negativa los dispersa del haz a grandes ángulos.

Un buen número de electrones desviados se pueden entonces absorber mediante un filtro de metal muy espeso. El resto atraviesa, en línea recta, las regiones de nitruro de silicio de la máscara y pasa sin impedimento por un agujero de la parte central del filtro. La apertura del filtro se puede ampliar o reducir, como el diafragma de una cámara fotográfica, para controlar el contraste de la imagen. El sistema también contiene varios imanes que actúan a modo de lentes para reducir a una cuarta o quinta parte la imagen grabada sobre la máscara.

Los físicos de Bell escribieron en un número reciente de *Applied Physics Letters* que habían impreso el dibujo de una rejilla en una superficie de 50 micrometros cuadrados. Más tarde, en la reunión de la Sociedad norteamericana de Investigación de Materiales, explicaron qué hicieron para grabar un dibujo de un milímetro cuadrado.



A pesar de la espectacularidad de los resultados, la región más extensa cuya impresión se ha logrado dista un largo centenar de veces de la que se necesitaría para la producción real de pastillas. Los competidores de Berger y Gibson que trabajan para la compañía IBM en el centro Thomas J. Watson se muestran escépticos sobre las posibilidades reales de esa técnica. A los de Bell les aguardan un montón de problemas, afirma Dieter Kern, director de nanoestructuras y dispositivos de exploración en IBM. Esta es una de las razones por las que esta última empresa abandonó sus experimentos con haces de electrones en la década de los setenta para concentrarse en la litografía de rayos X.

Encontrar una manera de trabajar con una máscara de capa fina, que mida 2500 milímetros cuadrados y su espesor no supere el micrometro puede constituir una empresa aterradora. "¿Qué pasa si se dilata una fracción de micrometro? Es todo lo que hace falta para que deje de funcionar", indica Kern. Otras dificultades técnicas pueden resultar incluso menos domeñables que la máscara. "Será difícil

proyectar, construir y manejar lentes para una pastilla de 100 milímetros cuadrados con aberraciones despreciables", dice Kern.

La fabricación de pastillas de alta densidad es la aplicación obvia para la máscara; AT&T calla, sin embargo, a propósito del uso de la técnica. Kern sospecha que el método puede mostrar su utilidad en la construcción de las finas redes empleadas para ajustar las frecuencias luminosas en los láseres de semiconductores.

Pero la posibilidad de que la máscara de AT&T permita impresionar un microcircuito completo aviva la esperanza de dar un salto cualitativo. "Todo lo que dice Kern respecto a problemas es verdad", comenta Berger. "Pero lo que nos impulsa es lo que obtendríamos si tuviéramos éxito. Nos hemos limitado a poner de nuevo sobre la mesa esa técnica porque creemos que vale la pena pensarlo una vez más."

Si el éxito les acompaña, las máquinas de proyección de haces electrónicos para litografía —más baratas que los sincrotrones empleados para producir los rayos X— entrarán en la parrilla de salida a la caza de la pastilla de gigabits, donde cabrán 35 libros del grosor de *Guerra y Paz*.

Tómalo. Manipulación de la realidad virtual

Vivian Cody, cristalógrafa, creía entender cómo se trababan fármacos antitumorales y las enzimas. Pero cuando empezó a manipular un brazo mecánico pendular para poner una molécula de fármaco en contacto activo con una enzima, la resistencia que encontró en el dispositivo le sacó de su error. "Al impulsar el fármaco hacia un hueco de la enzima, noté como si hubiera intentado clavarla en una pared de ladrillo."

Cody trataba de aplicar una nueva capacidad de los ordenadores: crear experiencias de realidad virtual. (La realimentación forzada, así se llama la técnica, permite "tomar" lo que se ve en la pantalla.) El servomecanismo que ella manejaba empujó hacia atrás. Tiró y se retorció, algunas veces fuertemente. Los movimientos simulaban la magnitud de la atracción, repulsión y torsión que se producían como suma de las interacciones atómicas entre las dos moléculas.

La realimentación forzada añade sensación a la imagen y sonido de la realidad virtual. Cody empleó el sistema en la Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill, uno de los centros pioneros en ese campo. Allí, Frederick P. Brooks, Jr., profesor de informática, comenzó a trabajar en

realimentación forzada cuando alboreaba la década de los setenta, en el marco del proyecto GROPE.

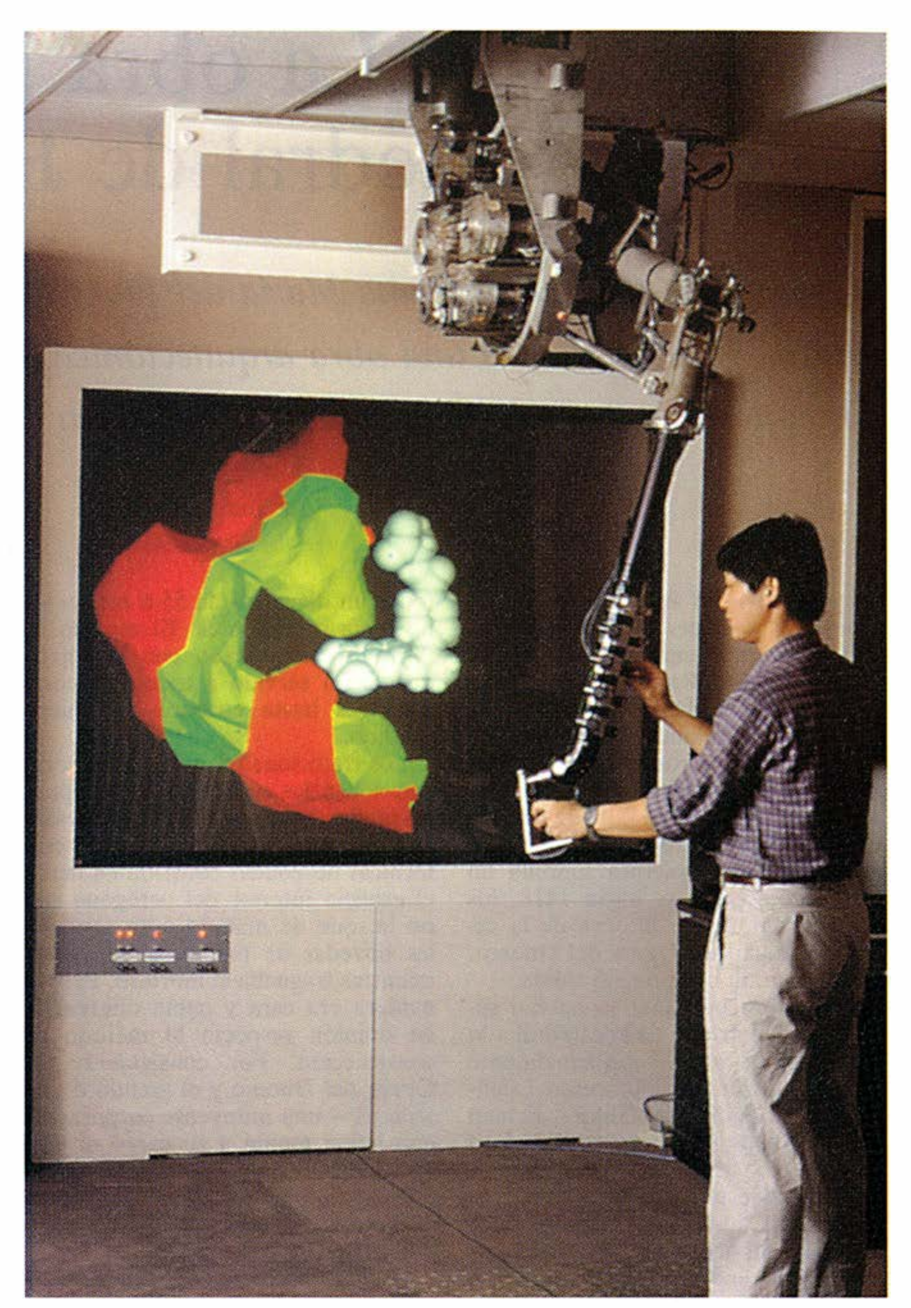
Merced a su último avance en realimentación forzada, un químico puede controlar un servomecanismo y variar la posición del fármaco en la pantalla hasta que se enlaza con la enzima en el nivel de energía más bajo y estable. El servomanipulador, regalo del Laboratorio Nacional de Argonne que tiempo atrás controló un brazo robot para manejar materiales radiactivos, opera como la palanca de un videojuego.

La pantalla muestra las posiciones relativas del fármaco y la enzima. Hay "termómetros de energía" que señalan el nivel de la energía de enlace. El conjunto de programas que controla el servomecanismo representa la fuerza y la torsión en tres dimensiones, mediante un modelo clásico de interacción molecular ideado por Peter A. Kollman, de la Universidad de California en San Francisco.

La técnica trasciende su carácter lúdico para entretenimiento de los químicos. Sentir el módulo y la dirección de las fuerzas les permite sacarle mayor partido a su trabajo. "Me produjo una sensación intuitiva de hacia dónde quería ir, que no había podido saber mirando sólo los números", confiesa Cody. Un estudio de Ming Ouh-Young, de los laboratorios AT&T Bell, probó que podía hallarse la manera correcta de enganchar el fármaco con la enzima dos veces más deprisa con el recurso a la realimentación forzada.

El sentir los efectos de las fuerzas aplicadas adquiere parejo interés en otros campos. La técnica puede convertirse en una poderosa ayuda a la enseñanza. Los alumnos de primer año de física de la Universidad de Carolina del Norte usaron un sistema de realimentación forzada para examinar las fuerzas electromagnéticas en el interior de un tubo de vacío. El uso del sistema ayudó a desechar la idea de que el campo era mayor en la placa que en el cátodo.

Un paso todavía más refinado consiste en modelar la textura misma de los objetos. En el laboratorio de medios del Instituto de Tecnología de Massachusetts, Margaret Minsky y sus colaboradores han ideado "Papel de Lija", un sistema de realimentación forzada que comprueba si una persona puede ordenar diversos grados de papel de lija en razón de su aspereza. Esta se simula moviendo unas palanca por encima de una serie de pequeños e imaginarios "baches". La sensación es algo parecida a la de mover un lápiz sobre una superficie áspera. Cuando el movimiento "remonta" un bache, el sistema calcula una fuerza proporcional a la pendiente de su ladera. La percepción de la textura no tiene por qué limitarse a la burda imitación del papel de lija. Minsky quiere extender la simulación a substancias blandas y pegajosas.


LA REALIMENTACION forzada se usa en la Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill para ayudar a entender de qué modo un fármaco (molécula blanca) se enlaza con una enzima. Foto de Bo Strain.

AT&T abriga el deseo de servirse de la realimentación forzada para amplificar la voz en telecomunicaciones. Con ese propósito está experimentando con juegos para lograr que el emisor alcance y toque algo o alguien.

Por su lado, los investigadores de los laboratorios Bell trabajaban en otras posibilidades. Por ejemplo, en un guante táctil y capaz de aplicar presión sobre la palma de la mano; una vez desarrollado, podría permitirle al profesor sentir y corregir el movimiento del escalpelo del alumno que realiza sus prácticas de cirugía con cadáveres.

La realimentación forzada podría acabar convirtiéndose en herramienta para fabricar productos de consumo más fáciles de manejar. En el Instituto de Ingeniería Mecánica de la Universidad japonesa de Tsukuba se ha creado un sistema de realidad virtual para juzgar qué sensación produce el prototipo de una cámara representada mediante programas de diseño ayudado por ordenador.

La obra de la catedral de Florencia

La cúpula octogonal de Santa Maria del Fiore, coronada por una linterna, un orbe y una cruz, es una obra arquitectónica única. La construcción del conjunto hizo avanzar la ingeniería y la técnica del inicio del Renacimiento

Gustina Scaglia

En 1294, las autoridades religiosas y civiles de Florencia decidieron ampliar la pequeña iglesia de Santa Reparata y dedicarla a Santa María. Más de cien años después, los ciudadanos florentinos pudieron ver los muros de la catedral de Santa Maria del Fiore elevarse en el centro de su ciudad, a falta de una cúpula. El cubrir o abovedar el espacio abierto de la estructura suponía un reto tecnológico, y, hacia 1418, los administradores de la obra de la catedral, llamada la Opera del Duomo, estaban en un callejón sin salida.

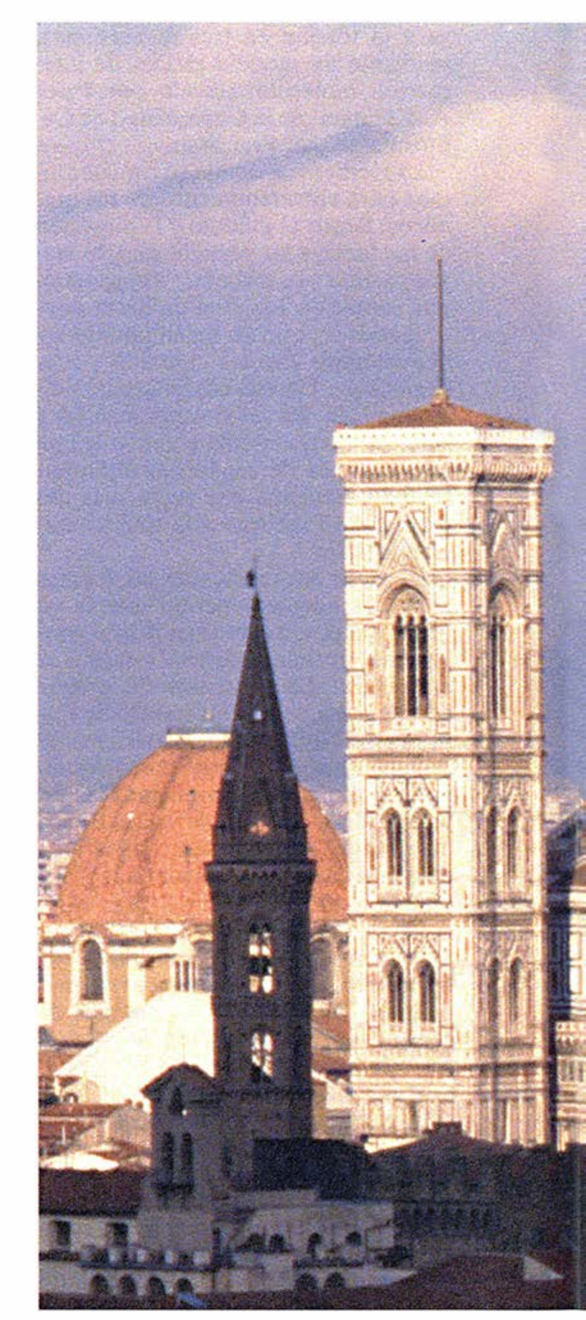
Los arquitectos que se habían sucedido en el diseño de la catedral a lo largo de los años —principalmente Arnolfo di Cambio, Francesco Talenti y Giovanni di Lapo Ghini— habían construido los ocho muros del crucero donde se instalaría el altar mayor. Los muros estaban destinados a soportar una majestuosa cúpula. Pero abovedar un octógono —y particularmente uno enorme (la cúpula debía tener un diámetro de 55,6 metros)— no tenía precedentes. El modelo de Arnolfo, completado con la cúpula que había servido a todos los constructores hasta entonces, se había perdido.

Los tradicionales métodos de construcción y las máquinas de la época no podían salvar la dificultad presentada por esta estructura. Una de esas técnicas heredadas consistía en llenar el espacio interior del octógono con un bosque de madera para soportar las bóvedas de piedra de la cúpula mientras fraguaba el mortero. Pero la madera era cara y había diferencias de opinión respecto al método de construcción. Por consiguiente, la Opera del Duomo y el gremio de tejedores —una influyente corporación que había tenido a su cargo el proyecto desde 1331— anunciaron un concurso de arquitectos, según era costumbre en los gremios de la república de Florencia.

En 1420 fueron elegidos dos maestros arquitectos. Filippo di Ser Brunelleschi (1377-1446), un escultor y orfebre florentino, había descrito, aunque aún no presentado, un modelo para construir la cúpula por un método novedoso y casi revolucionario. Su principal contrincante, Lorenzo Ghiberti (1378-1455), otro escultor y orfebre, fue nombrado junto con Brunelleschi. Ghiberti era popular entre los representantes de la comunidad y de los gremios porque había ganado el concurso para ejecutar, en 1402, las puertas de bronce del Baptisterio frente a la catedral. Brunelleschi había sido el perdedor en dicho concurso.

Brunelleschi propuso la construcción de una cúpula de doble bóveda, con un cascarón interior y otro exterior, algo que no se había reali-

GUSTINA SCAGLIA ha estudiado los dibujos de las máquinas del Renacimiento diseñadas por Filippo di Ser Brunelleschi, Leonardo da Vinci y Francesco di Giorgio Martini. Hasta hace poco, enseñaba historia del arte y arqueología en el Queens College de la Universidad Municipal de Nueva York. Se doctoró, en 1958, en el Instituto de Bellas Artes de la Universidad de Nueva York. Después de descubrir los dibujos de las invenciones de Brunelleschi en 1955, Scaglia redactó una monografía y más tarde publicó una obra describiéndolos. Ha terminado un libro, de próxima aparición, sobre los dibujos de ingeniería y los tratados de Francesco di Giorgio Martini (1439-1501). Este ingeniero sienés será recordado en la celebración del 750 aniversario de la Universidad de Siena, que tendrá lugar durante el año en curso.



zado hasta entonces. Esta cúpula debía construirse sin las costosas cimbras (las estructuras provisionales de madera que soportan una bóveda mientras se construye). Esta innovación permitiría hacer cada nivel de construcción suficientemente fuerte como para sostenerse por sí mismo mientras los trabajadores levantaban el nivel siguiente. Para acometer esta nueva técnica, segura, Brunelleschi había inventado varias máquinas, tales como cabrias y grúas con brazos para situar la carga.

Deseaba ser el único arquitecto del proyecto, puesto que sólo él conocía la técnica. Ideó una estratagema para apartar a Ghiberti de la construcción de la cúpula. Según el biógrafo de los artistas del Renacimiento Giorgio Vasari (1511-1574), quien basaba a su vez esta información en una biografía de Brunelleschi escrita por Antonio Manetti, el arquitecto fingió una enfermedad, dejando a Ghiberti solo en la dirección de los obreros. Ghiberti no supo cómo proceder, con lo que el trabajo sufrió un parón hasta que Brunelleschi volvió a la obra; su autoridad salió reforzada.

Por ironía de las cosas, los dibujos más detallados de las máquinas de Brunelleschi para la construcción llegaron de la mano del nieto de Ghiberti, Buonaccorso Ghiberti (1451-1516). En 1955 encontré su cuaderno de bocetos en la Biblioteca Nacional de Florencia. Estas notas, combinadas con los ya publicados archivos de la Opera del Duomo (ordenados desde 1293), que incluyen los nombres de los trabajadores y administradores y las fechas con los montantes de los pagos por la labor y los materiales, nos ofrecen una visión bastante nítida del progreso de la obra y de la labor de Brunelleschi. Usando estas fuentes gráficas y documentales, conseguí esclarecer cómo Brunelleschi utilizó las máquinas para construir la doble bóveda y cómo colocaron, más tarde, el orbe o esfera,

1. SANTA MARIA DEL FIORE se eleva sobre la ciudad italiana de Florencia. La catedral fue construida por etapas entre los años 1293 y 1470.





2. EL PANTEON de Roma fue uno de los edificios que estudió Filippo di Ser Brunelleschi, arquitecto de la cúpula de Santa Maria del Fiore. Tiene una cúpula circular y, en su parte superior, un óculo que constituye la única fuente de luz natural para el interior. (Foto de Gaetano Barone.)

de unos 1486 kilogramos de peso, y la cruz en lo alto de la linterna.

Brunelleschi —considerado fundador de la arquitectura del Renacimiento— buscó en los edificios de la antigua Roma los elementos de los órdenes clásicos (dórico, jónico y corintio), alterando sin embargo el diseño de sus obras posteriores. Aplicó también los principios matemáticos conocidos en la época para obtener un sistema de proporciones arquitectónicas que estuviese a escala de las dimensiones humanas. Los logros técnicos de Brunelleschi, incluidos en sus innovadoras máquinas y subsecuente diseño de nuevos edificios, permitieron avanzar los métodos arquitectónicos del Renacimiento.

Brunelleschi superó las limitaciones tecnológicas que causaban serios problemas a algunos de sus contemporáneos. Vasari nos lo describe fascinado por "el tiempo, el movimiento, los pesos y las ruedas, cómo las ruedas pueden ser giradas y desplazadas, de manera que construyó algunos buenos y bellos relojes". También pintó cuadros para ilustrar la perspectiva, introduciendo el concepto de punto de fuga en su famosa pintura del Baptisterio. Con ello, revolucionó alguno de los principios de la pintura renacentista, introduciendo la ilusión de tridimensionalidad para los objetos representados sobre una superficie plana. En el uso de las proporciones y de la geometría, estaba influido por el matemático y astrónomo florentino Paolo del Pozzo Toscanelli (1397-1482).

Además de sus conocimientos de matemáticas y mecánica, Brunelleschi pasó cierto tiempo en Roma midiendo y estudiando las ruinas. Estas construcciones le proporcionaron claves materiales de las técnicas romanas para la construcción de grandes bóvedas. Según Vasari, Brunelleschi había examinado las cimentaciones de cada edificio en Roma antes de 1428, anotando los procedimientos para la colocación de aparejos de ladrillos, junto con los métodos de corte y transporte de sillares, que podía distinguir por sus muescas y marcas de cantero. Algunas de las características de la cúpula de Santa Maria del Fiore son el resultado de esos descubrimientos. En particular, sus estudios le ayudaron a resolver el problema de la cúpula de la catedral.

En el momento del concurso para el proyecto de la cúpula, en 1418, la idea de Brunelleschi era controvertida porque el método de construcción por él propuesto no tenía precedentes. Las cúpulas que se habían hecho hasta entonces eran pequeñas, semiesféricas, tales como las de las catedrales de Pisa y Siena o el Panteón de Roma. El Panteón era una bóveda de simple cascarón semiesférico con un óculo, o abertura, en la coronación que constituía la única fuente de luz natural para el interior. Esta cúpula y las bóvedas romanas en ruinas pudieron haberle servido de guía para encontrar su solución. Finalmente, los florentinos le autorizaron empezar su trabajo, pero los documentos de la Opera del Duomo sobre las reuniones para analizar el procedimiento muestran que sus miembros permanecían cautos al respecto.

Abovedar sin construir una cimbra fue tal vez el logro más notable de Brunelleschi. Los arcos góticos del crucero octogonal de Santa Maria del Fiore (considerados antagónicos a los arcos de medio punto romanos) no estaban construidos tan altos como los de la cúpula. Además, los de la cabecera habían utilizado soportes de madera. Para la cúpula, sin embargo, Brunelleschi determinó que algunos ladrillos podrían colocarse en ángulo unos con respecto a otros, creando una estructura adecuada que pudiese absorber el peso de la cúpula a medida que se iba elevando. El peso de cada nueva hilada de ladrillos se transmitía a los pilares y muros del octógono.

Inventó también un sistema de cadenas de sillares para juntar las bóvedas. Estos sillares, unidos a los nervios de ambas bóvedas, se reforzaban con grapas de metal en forma de cruz. Los sillares unen cada estrato de las bóvedas horizontal y verticalmente, reforzando la construcción. Sin ellos, los nervios reventarían, hundiendo la cúpula.

Brunelleschi incorporó en su modelo otros artificios prácticos. Se construyeron canalones en el exterior y aberturas en las bóvedas externas para disipar la fuerza del viento que, además, podían disminuir el riesgo de tensiones estructurales en los movimientos de tierra. Colocó anillos de hierro que prestaran soporte a los andamios para que los artistas pudiesen pintar frescos o colocar los mosaicos. (Vasari escribió que Brunelleschi instaló una cocina en lo alto de las bóvedas y andamios, para que los operarios no perdiesen tiempo en descender al nivel de la calle para comer).

Proyectó el cascarón exterior de la cúpula para proteger el interior, con una estructura reforzada contra el asalto del viento y de la lluvia. El espacio entre los cascarones sirvió para colocar pasos y escaleras que permitían a los operarios construir ambas bóvedas y repararlas.

En la coronación de la cúpula, donde convergen los ocho nervios verticales de las bóvedas exterior e interior, diseñó un cierre de piedra circular, denominado serallo. Rodea éste los muros del óculo, que mide 6 metros de diámetro y de 3,7 a 4,6 metros de ancho. El óculo sirve de clave para los ocho arcos de la cúpula. Cada uno de los ocho lados del óculo tiene tres ventanas que franquean el paso de la luz y el aire al serallo.

Las ventanas sirvieron también para otro propósito, una prueba más del genio con el que Brunelleschi concibió su diseño y su función. Largas vigas de madera pueden colocarse entre las ventanas a través del óculo. Cuando se han puesto suficientes, forman un piso provisional que permite colocar las grúas durante la construcción de la linterna de mármol y la instalación del orbe y la cruz. Todos los materiales necesarios para la linterna se izaron a través de una abertura en la plataforma.

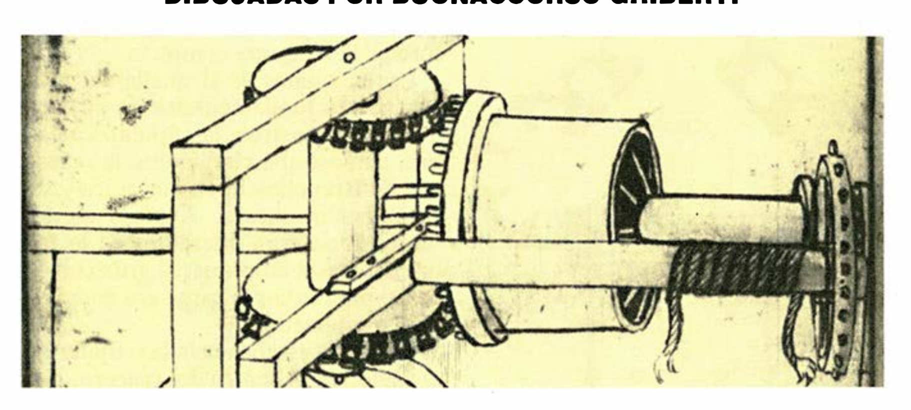
Aunque la linterna era el elemento crítico de Brunelleschi para la cúpula de doble cascarón proyectada en 1418, se anunció un concurso para su diseño cuando la cúpula estuvo terminada. En 1436 ganó el modelo de Brunelleschi. Este modelo se conserva aún. Los ocho contrafuertes de la linterna trabajan para transmitir el peso a los nervios de la cúpula y luego, en descenso vertical, a los ocho grandes pilares del octógono.

La habilidad política de Brunelleschi tuvo una contrapartida en su diseño arquitectónico. Una de las ocho columnas de la linterna está hueca y contiene una escalera de gran pendiente que permite el acceso al pináculo cónico, la estructura que da soporte al orbe y la cruz. Cuando presentó su modelo a las autoridades, dejó la escalera cuidadosamente escondida, mostrándola sólo cuando los jueces preguntaron cómo podrían acceder los trabajadores a lo alto para construir el pináculo. Las catedrales en Italia están a menudo coronadas con un orbe y una cruz, símbolos del poder de los cardenales y de San Pedro de Roma.

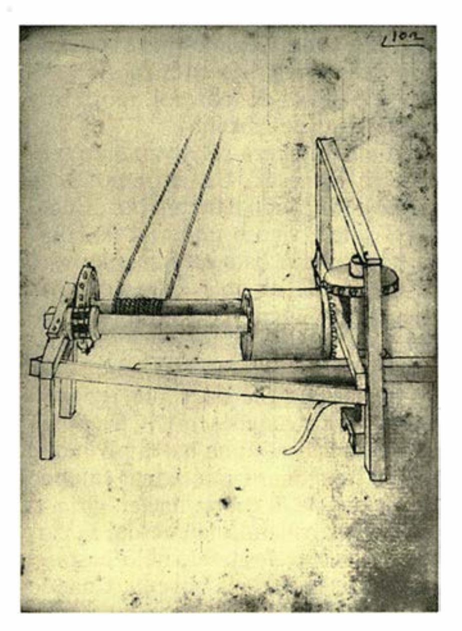
Para realizar cada una de las innovaciones de Santa Maria del Fiore, Brunelleschi ideó máquinas capaces de izar enormes pesos a grandes alturas, de tal modo que fuesen accesibles con precisión a los operarios que debían colocarlos en su lugar. Abarcaban esos ingenios una cabria, grúas con brazos para situar la carga y amarradores especialmente diseñados, que evidencian su conocimiento de la mecánica y su visionario sentido de la construcción. Las máquinas eran también seguras y permitían completar el trabajo con relativa rapidez.

A causa del espíritu de competitividad artística que reinaba en Florencia, Brunelleschi se mostraba muy reservado sobre su modelo para la cúpula y acerca de sus máquinas. Temía que sus ideas pudiesen ser copiadas y, consecuentemente, nunca las reflejó en un papel (las patentes eran aún

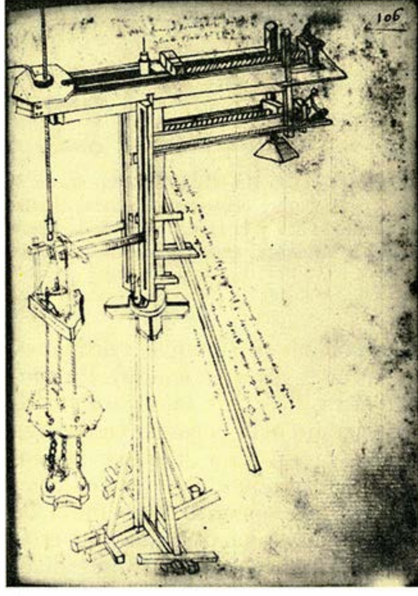
MAQUINAS DE BRUNELLESCHI DIBUJADAS POR BUONACCORSO GHIBERTI



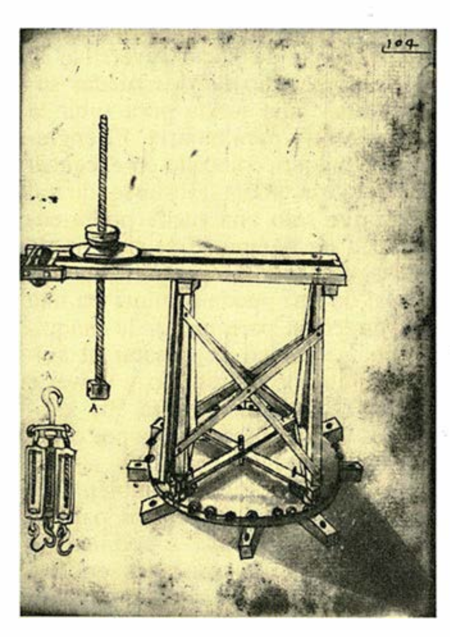
CABRIA REVERSIBLE (DETALLE)



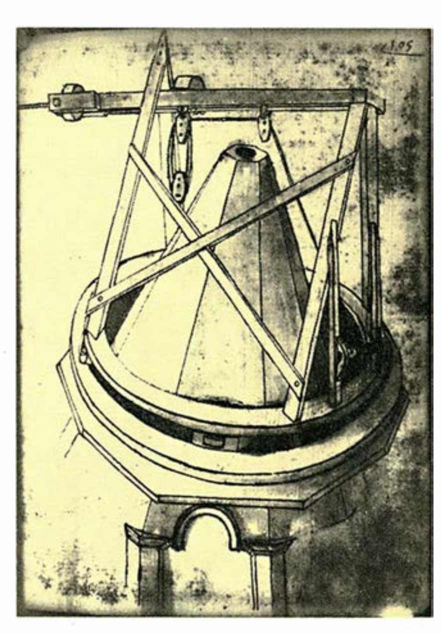
CABRIA REVERSIBLE (OTRA VISTA)



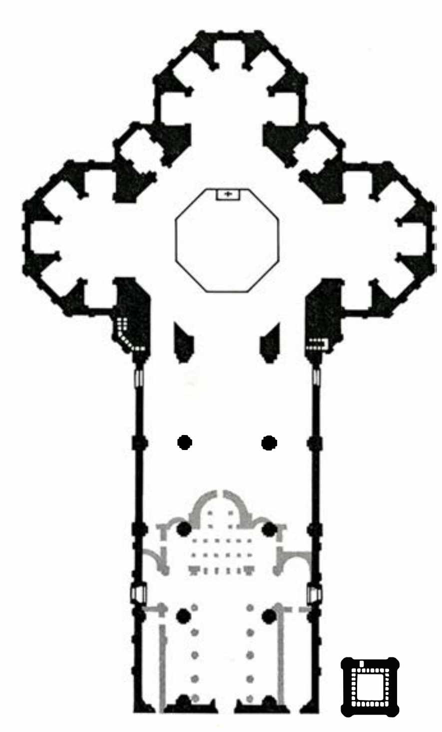
GRUA



GRUA PARA CONSTRUIR LA LINTERNA



GRUA PARA CONSTRUIR EL PINACULO



3. PLANTA DE LA CATEDRAL, donde se muestra el crucero octogonal que rodea el altar mayor de la seo y la cimentación de la iglesia de Santa Reparata, que está sepultada debajo.

desconocidas en Florencia y acababan de entrar en uso en Venecia). En consecuencia, llegó tan lejos su desconfianza como para encargar cada pieza de una cabria a un diferente carpintero, herrero, fundidor y otros artesanos. Cada operario vivía fuera de Florencia, porque Brunelleschi estaba implicado en las cambiantes alianzas y rivalidades de la ciudad. Daba a cada artesano solamente un simple boceto acotado de una parte; luego, él mismo unía todas las partes para formar la máquina completa.

Las máquinas de Brunelleschi fueron partes fundamentales de su técnica para construir la cúpula. La cabria demostraba claramente la maestría de Brunelleschi en mecánica y su habilidad inventora. Algunas piezas de la cabria eran diferentes de lo fabricado hasta entonces; la grúa con el brazo para situar la carga era completamente novedosa.

La cabria estaba anclada o fijada en el suelo, en el centro del crucero, debajo mismo del óculo. Allí permaneció durante 50 años hasta que fueron elevados primero la cúpula, luego la linterna y, finalmente, el orbe y la cruz. La cabria levantó para los operarios materiales de construcción (sillares, bloques de mármol, mortero y largas vigas de castaño).

La máquina era relativamente sencilla de manejar. Un extremo de la soga estaba unido a un tambor. Cuando el sillar, viga o material de construcción estaba listo para ser elevado, se aseguraba al otro extremo de la cuerda por medio de unos amarradores de sillares (un ingenio romano, semejante a unos estribos, que se introduce en la piedra y fue redescubierto por Brunelleschi). Caballos o bueyes uncidos a una barra pivotante hacían funcionar la máquina. Cuando las ruedas de la cabria hacían girar el tambor, enrollando la cuerda, la carga se elevaba desde el suelo hasta el lugar necesario de la bóveda. Cuando llegaba arriba, el operario gritaba a los encargados de la cabria que hiciesen detener la máquina.

Brunelleschi ideó ingeniosamente el modo de hacer reversible la cabria por medio de dos ruedas superpuestas; una servía para subir la soga y la otra para bajarla. El engranaje de madera colocado en el centro de la cabria podía ajustarse de tal modo que sólo una rueda podía engranar a un tiempo. Este sistema de embrague reversible permite que el animal de tiro pueda caminar en una sola dirección para mover la máquina, sin necesidad de desatar al animal, cambiarle de sentido y volverle a atar. (La cuerda pesaba 502 kilogramos y fue confeccionada por constructores de barcos de Pisa.)

Brunelleschi concibió también nuevos componentes mecánicos para la cabria llamados *palei* —rodillos de madera giratorios ajustados en hierros de sección en U— que obraban como dientes de engranaje de baja fricción. Había 91 *palei* en la rueda principal. Estos rodillos sirvieron para reducir las pérdidas de energía por fricción en la rueda conductora.

Para sus máquinas, Brunelleschi adaptó unos sistemas de amarres de piedras, o grapas de cuña, que ajustaban dentro de unos huecos de los sillares cuando se transportaban por el aire. Estas grapas de cuña, entonces conocidas como holivelas, ajustaban a presión en los sillares evitando su caída. Unos torniquetes con unos enganches asían estas holivelas y las elevaban para asegurar su transporte. Las holivelas estaban formadas por tres piezas de hierro en forma de cuña que encajaban en una ranura hecha en el sillar de forma similar a los sistemas de caja y espiga, evitando de esta manera que pudiesen soltarse.

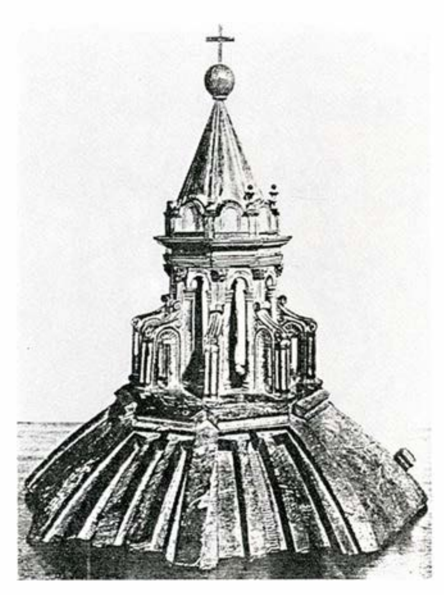
Una vez que la carga se izaba por la cabria reversible, una grúa especial, también ideada por Brunelleschi, la colocaba en el lugar de trabajo. Esta grúa giraba, y su brazo transportaba los materiales donde fuera necesario en la obra. El situador de carga deslizaba el material horizontalmente, mientras que un husillo situado en el extremo descendía la carga acercándola a la posición deseada. La grúa con su brazo situador de carga estaba coordinada con la cabria reversible.

Otra grúa fue proyectada para construir la linterna. Este aparato descansaba sobre una corona de rodillos, permitiéndola pivotar libremente. La grúa para la linterna incluía el brazo situador de carga diseñado por Brunelleschi. El conjunto del aparato estaba instalado a través del óculo, y sus vigas se insertaron en las ventanas del serallo.

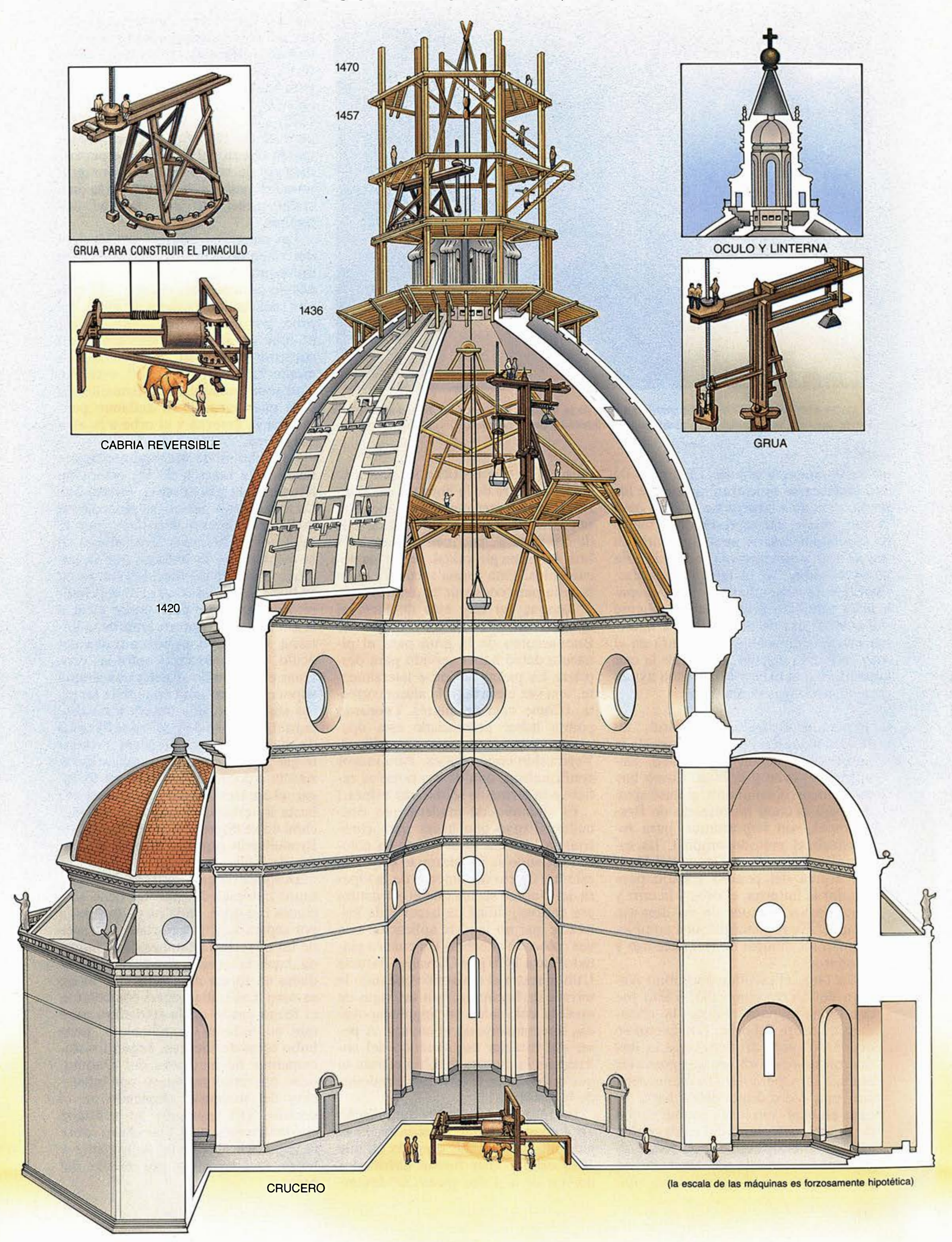
Las notas de Leonardo da Vinci, quien copió todos los dibujos de Buonaccorso sobre las ideas de Brunelleschi, arrojan alguna luz sobre la manera de trabajar de la grúa para construir la linterna. Leonardo describe ésta como teniendo "cuatro husillos de madera que elevan el andamio"; una vez levantado, puede construirse una fuerte plataforma bajo él".

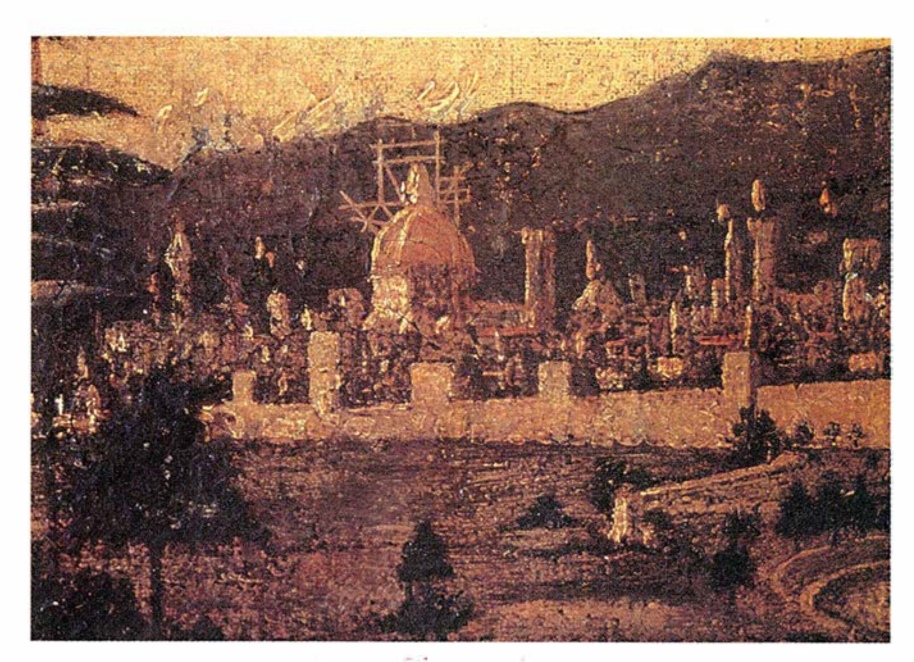
Se diseñó otra grúa más para construir el pináculo cónico. Su proyecto puede ser definitivamente atribuido a Brunelleschi, porque la linterna responde a su estilo, y habría preparado, además, cada etapa del trabajo. Por otra parte, el modelo de la linterna de Brunelleschi incluye el orbe y la cruz, de donde se deduce que había proyectado también los ingenios por medio de los cuales pudieran instalarse.

El desplazador del aparato para construir el pináculo consiste en un puente-grúa del que cuelga un siste-



4. MODELO DE LINTERNA, de Brunelleschi. El peso de la linterna se transmite a los ocho nervios de la cúpula, reforzando toda la estructura.


UNA VISTA DEL FUNCIONAMIENTO DE LAS MAQUINAS DE BRUNELLESCHI
1470
1457
1436
1420
GRUA PARA CONSTRUIR EL PINACULO
CABRIA REVERSIBLE
OCULO Y LINTERNA
GRUA
CRUCERO
(la escala de las máquinas es forzosamente hipotética)



5. GIOVANNI BATTISTA UTILI pintó una vista de la catedral de Florencia alrededor de 1470, donde aparece con nitidez el andamiaje que, diseñado por Brunelleschi, rodeaba la cúpula.

ma de sogas y poleas. El dibujo de Buonaccorso muestra únicamente los componentes básicos de la grúa para el pináculo, sin representar el fuerte andamio necesario para asegurarle en su lugar y sin ninguna indicación de cómo giraba la plataforma circular. Su dibujo, sin embargo, ofrece el aparato completo erigido en el saliente de la cornisa de mármol de la linterna. También señala la abertura en el vértice del pináculo, dentro de la que se fijarían el orbe y la cruz con ayuda de cuatro vigas de madera.

Cuando Brunelleschi murió, en 1446, aún no estaba terminada la linterna; quedaban por instalar, asimismo, el orbe y la cruz. Como hay muy pocos documentos e ilustraciones para deducir las técnicas de Brunelleschi, son importantes, para reconstruir el método original, las escuetas noticias de la Opera del Duomo acerca del penoso trabajo para instalar la linterna, el orbe y la cruz y reinstalarlos después de un desastre natural. Estas descripciones complementan los dibujos de Buonaccorso y Leonardo.

En 1468, el escultor florentino Andrea del Verrocchio (1435-1488) fue comisionado para realizar la armadura de cobre del orbe. (De la cruz se ocuparon otros artífices, que la instalaron sobre el orbe en una posterior etapa.) La Opera del Duomo especificó que Verrocchio debía hacer el orbe en ocho secciones con un cuello de bronce. La punta del cuello debía ajustar en el orificio del pináculo, siguiendo el modelo de Brunelleschi para la linterna. En ese mismo año, después de que las ocho secciones se soldaran fuera de la linterna, en la terraza de casi tres metros de anchura, se colocaba en su lugar el orbe de más de dos metros, por medio de una cabria de forma piramidal, según los documentos. Esta forma recuerda la de la grúa para construir el pináculo.

Aunque no hay más detalles, el aparato descrito en los dibujos de Buonaccorso de la grúa para el pináculo debió haber servido para desplazar las piezas del orbe lateralmente, una vez elevadas a la altura correcta. (Como nota de interés, Leonardo podría haber presenciado esta operación, puesto que era aprendiz de Verrocchio en esa época. Para mayor confirmación, una de sus notas se refiere a la forma de soldar una esfera.)

El andamio de madera que Brunelleschi tuvo que hacer para construir la linterna estaba todavía colocado cuando se instalaron el orbe y la esfera. (Cierto documento de la Opera del Duomo señala que la estructura era costosa, difícil de hacer y de instalar y que no tendría aplicación una vez colocado el orbe.) Un cuadro pintado hacia 1470 por Giovanni Battista Utili muestra el andamio rodeando la terraza de la cúpula, con sus vigas de madera colocadas en ángulo apoyadas directamente en la cúpula. A pesar del carácter esquemático del andamiaje, la pintura de Utili retrata lo que quedaba en la terraza y alrededor de la linterna.

En 1602, Gherardo Mechini diseñó un andamio similar y reconstruyó el pináculo de mármol, después de que éste, orbe y cruz fueran derribados por un rayo. Estas piezas se desperdigaron por el suelo, pero las secciones del orbe quedaron intactas y volvieron a utilizarse. Los rayos fueron una causa corriente de desperfectos para Santa Maria del Fiore. Los hubo en 1492, 1494, 1495, 1498, 1511, 1536, 1542, 1561, 1570, 1577, 1578 y 1586, pero el de 1600 fue tan devastador que la Opera del Duomo fue persuadida por decreto papal para consagrar unas reliquias en el interior de la cruz como protección ante futuras tormentas.

Las memorias escritas por Mechini describen la altura del andamio y en qué punto iba a ser reconstruido el pináculo para instalar el orbe. "El piso alto del andamio llega a nivel del orbe; por consiguiente, para colocar el orbe en su lugar, será necesario construir otro piso de aproximadamente 7,3 metros de alto", escribió. Con toda probabilidad, Brunelleschi tuvo que construir su andamio para instalar la linterna y el orbe a la misma altura.

Los dibujos de Mechini atestiguan también la función de los óculos de Brunelleschi y la linterna. Puesto que las tres cuartas partes del pináculo de la linterna fueron demolidos por el rayo, y sólo 20 de los 32 escalones de la columna de la linterna que la comunicaban con el pináculo estaban en su lugar, Mechini construyó el primer piso del andamio para poder estar a la altura de los contrafuertes de la linterna. Construyó un piso a través del óculo, colocando vigas entre las ventanas en el serallo. Realizó un simple trípode con una grúa en uno de los pisos superiores; una abertura en éste permitía el paso de pequeños bloques de mármol para el pináculo y varias largas vigas de castaño que asegurarían la colocación del orbe en su lugar, al ser elevado desde el pavimento hasta la terraza. El andamio de Mechini no se diferenciaba apenas del de Brunelleschi representado en el cuadro de Utili.

Después de que, en 1602, los artesanos hubiesen forjado las ocho secciones del orbe, cada pieza fue izada por separado y transportada, a través de las estrechas ventanas de la linterna, hacia la terraza, donde fueron soldadas en forma de esfera, que luego se doró. Los trabajadores controlaron el fuego usado en la soldadura para que no ardiese el andamiaje, pero hubo otros accidentes. Según los documentos de la Opera del Duomo, ocho operarios murieron por inhalación del mercurio empleado en el dorado. (El mercurio se utilizaba corrientemente para fijar el oro sobre la superficie del metal subyacente y luego se evaporaba por medio del fuego.)

Años después de la muerte de Brunelleschi, su linterna continuaba produciendo sorpresas. En 1511, los administradores de la Opera del Duomo autorizaban la perforación de una abertura de unos 25 milímetros enmarcada por un anillo de bronce. El orificio debía dejar que los rayos solares incidieran en un gnomon o reloj de sol, colocado en el piso del crucero. Los rayos de sol generaban una sombra cuya longitud o posición indicaba los solsticios de verano e invierno.

Este artificio astronómico de la linterna y el gnomon fue redescubierto en 1755 por el Padre Leonardo Jiménez, jesuita astrónomo. Deseaba observar los solsticios de verano e invierno y recalibró el gnomon. Hasta hace poco, los historiadores pensaban que el orificio astronómico era de su creación. Pero, en 1979, el archivero de la Opera del Duomo, Enzo Settesoldi, publicó el documento de un pago realizado, en 1475, por un anillo de bronce "para ser colocado en la linterna con objeto de ver dónde caen los rayos del sol en determinados días del año". El inventor de este artificio para el gnomon fue el matemático y astrónomo florentino Toscanelli, que había incitado a Brunelleschi a estudiar geometría.

Los conocimientos matemáticos y mecánicos de Brunelleschi le convirtieron en un precursor del moderno diseño estructural. Aunque sus inmediatos sucesores que construyeron cúpulas no usaron sus máquinas y volvieron a los ingenios tradicionales, de cabrestantes y poleas, algunos elementos de sus máquinas se anticiparon a los de la revolución industrial.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

DRAWINGS OF BRUNELLESCHI'S MECHANICAL INVENTIONS FOR THE CONSTRUCTION OF THE CUPOLA. Gustina Scaglia en *Marsyas: Studies in the History of Art*, vol. 10, págs. 45-68; 1960-61.

BRUNELLESCHI'S CLOCK? Frank D. Prager en *Physis. Rivista Internazionale di Storia della Scienza*, vol. 10, fasc. 3, págs. 203-216; 1968.

BRUNELLESCHI'S DOME OF S. MARIA DEL FIORE AND SOME RELATED STRUCTURE. Rowland Mainstone en *Transactions of the Newcomen Society*, vol. 42, págs. 107-126; 1969-70.

BRUNELLESCHI: STUDIES OF HIS TECHNOLOGY AND INVENTIONS. Frank D. Prager y Gustina Scaglia. The MIT Press, 1970.

BRUNELLESCHI'S HORIZONTAL ARCHES AND RELATED DEVICES. Thomas B. Settle en *Annali dell'Istituto e Museo di Storia della Scienza*, vol. 3, fasc. 1, págs. 65-80; 1978.

Espectroscopía astrofísica con fibras ópticas

Las fibras ópticas pueden transformar imágenes bidimensionales en unidimensionales. En astrofísica, permiten la observación simultánea de un gran número de objetos o de muchas regiones de un objeto extenso

Santiago Arribas

La metodología empleada en astrofísica difiere de la que caracteriza a otras ramas de las ciencias físicas. En éstas, la experimentación constituye la base sobre la que se fundamenta el conocimiento; el investigador astrofísico, por contra, se ve incapaz, en general, de realizar tal actividad. Experimentar implica cierto poder de interacción y control sobre el sistema físico sometido a estudio. Ahora bien, los objetos astrofísicos se presentan como sistemas físicos de acceso muy limitado, con los que apenas podemos interactuar. Por ejemplo, no podemos provocar la explosión de una supernova, ni favorecer el nacimiento de una galaxia, ni dejar caer una estrella sobre un agujero negro, para comprobar experimentalmente teorías o modelos.

Más aún. Tampoco podemos, salvo algunas excepciones, simular en el laboratorio los procesos físicos que ocurren en el resto del universo. La razón es evidente: las escalas de energía, espacio y tiempo que involucran los procesos astrofísicos difieren, en varios órdenes de magnitud, de las que definen nuestro entorno cercano. Estos hechos explican que, en astrofísica, la experimentación deje paso a la observación. Por observación entendemos el proceso de detección y registro de algún tipo de señal (generalmente, radiación electromagnética) procedente de los objetos en estudio. Esta señal, que suele venir determinada por múltiples efectos simultáneos, se interpreta en el marco de modelos fundamentados en las leyes de la física. De esta forma, se infiere la información acerca de los objetos en estudio.

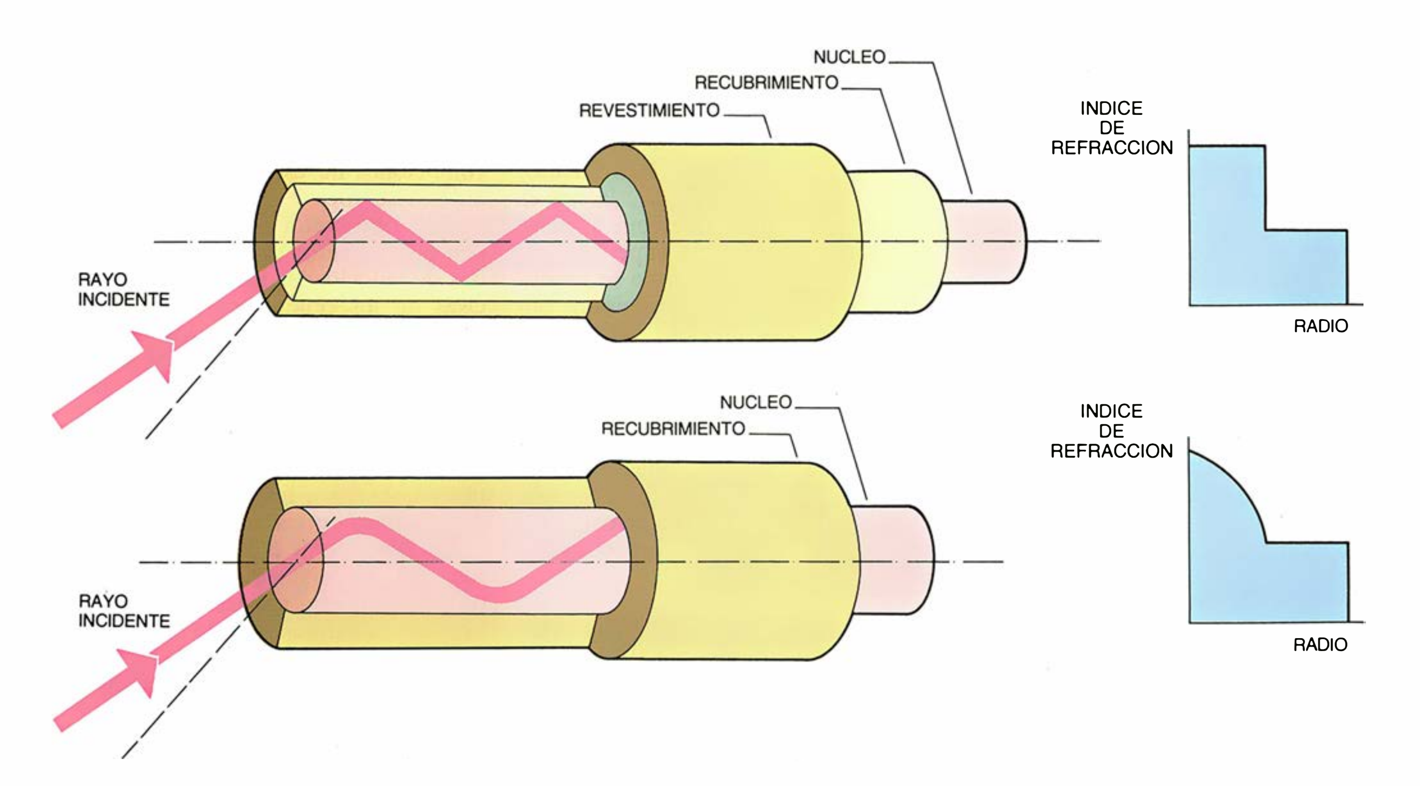
La historia de la astronomía y la astrofísica nos enseña que los grandes avances han sido consecuencia, a menudo, de una mejora en la capacidad de observación. La invención del telescopio óptico, así como la aplicación de la fotografía y espectroscopía en este contexto, son claros ejemplos. Aunque los orígenes de la astronomía se encuentran en la observación del cielo a ojo desnudo (sin ayuda de instrumentos), la invención del telescopio óptico aceleró el firme desarrollo de esta ciencia. Gracias al telescopio no sólo fue posible agrandar la imagen de algunos objetos astronómicos, sino que, al captar más radiación que la recogida por la pupila, se consiguió ver otros nuevos. La aplicación de la fotografía en astronomía supuso también un gran avance al permitir registrar de forma duradera imágenes y espectros, posibilitando análisis cuantitativos más detallados.

La capacidad de descomponer la luz con la ayuda de espectrógrafos provocó un cambio cualitativo en el estudio de los objetos astronómicos. La interpretación de los espectros llevó a inferir las condiciones físicas y composición química de estos objetos, así como aspectos relativos a su cinemática. Es, quizá, la espectroscopía la técnica que provocó el nacimiento de una nueva rama de la astronomía: la astrofísica. A diferencia de la astronomía tradicional, que se ceñía a los aspectos morfológicos y dinámicos, la nueva disciplina comenzó a ocuparse del estudio físico de los astros. Otras técnicas de análisis de la luz, como la fotometría o la interferometría, han resultado también de gran interés en astrofísica al ayudar a resolver problemas de índole física. La extrapolación de todas estas técnicas de observación a otras regiones del espectro electromagnético, a las que no son sensibles nuestros ojos ni la mayor parte de las emulsiones fotográficas, como el radio, infrarrojo, ultravioleta, rayos X y rayos gamma, ha contribuido de forma notable al desarrollo de la astrofísica a lo largo de este siglo.

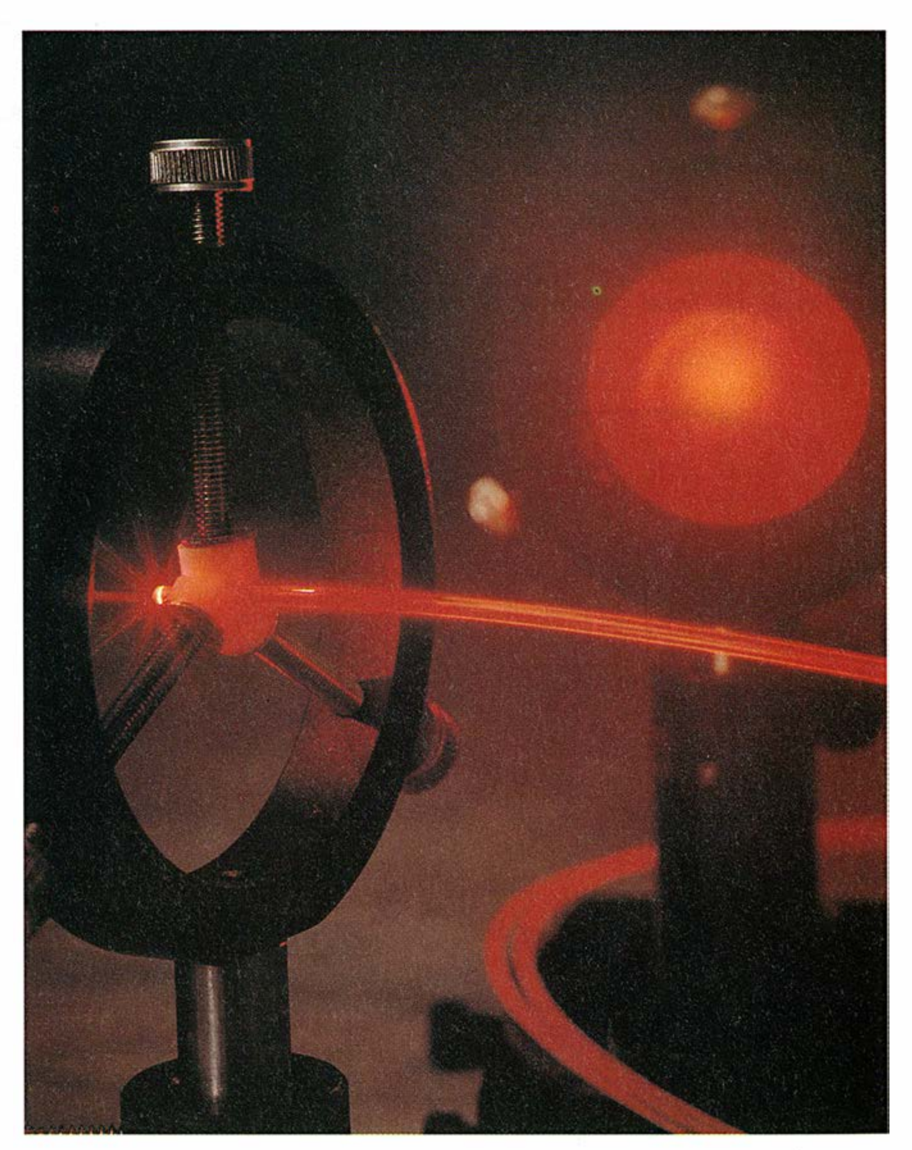
El proceso de mejorar nuestra capacidad de observar no cesa. Por una parte, los telescopios espaciales acceden a regiones espectrales que quedan total o parcialmente bloqueadas por la atmósfera, evitando las perturbaciones que ésta produce. Por otra, gracias al desarrollo de grandes telescopios terrestres, podemos recoger la luz de objetos muy débiles y lejanos, en el espacio y en el tiempo.

Ahora bien, no todos los esfuerzos están dirigidos a evitar los efectos de la atmósfera o a construir telescopios capaces de recoger más radiación. Con igual intensidad se intenta optimizar el proceso de detección de la radiación. Para tal fin se construyen complejos instrumentos, que aprovechan los recientes avances en distintos

SANTIAGO ARRIBAS pertenece al Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC). Su línea de investigación se centra en los aspectos observacionales de la teoría de evolución estelar y la teoría de atmósferas estelares en estrellas de baja masa. De 1981 a 1983 trabajó sobre procesado de imágenes y holografía en el Instituto de Optica del CSIC, en Madrid. En 1983 se trasladó al IAC, desde donde estableció una estrecha colaboración con el grupo de astronomía estelar del departamento de astrofísica de la Universidad de Oxford y con el grupo de astronomía infrarroja del Colegio Imperial de Londres. En 1987 obtiene el doctorado en astrofísica y desde entonces trabaja junto con otros investigadores del IAC sobre las propiedades de estrellas pertenecientes a cúmulos globulares. En la actualidad dirige un proyecto encaminado a investigar las posibilidades de las fibras ópticas en astrofísica. El autor agradece las sugerencias de J. L. Rasilla y E. Mediavilla durante la redacción del artículo y a R. Castro su ayuda en la elaboración de las figuras.



1. LAS FIBRAS OPTICAS son conductos flexibles que permiten transportar la luz. En las de índice de refracción discontinuo podemos distinguir tres zonas: la más interna o núcleo, la intermedia o recubrimiento y la externa o revestimiento. La diferencia de índice de refracción entre el núcleo y el recubrimiento hace que los rayos de luz se reflejen en su interior, siempre que éstos incidan con el ángulo adecuado. En las fibras ópticas de índice de refracción gradual, éste disminuye de forma continua hacia el exterior, propagándose los rayos en su interior de manera sinusoidal. El revestimiento protege la fibra óptica. Algunos tipos de fibras construidas con materiales plásticos carecen del mismo.



campos de la técnica, en particular de la óptica instrumental, la electrónica, la física de detectores y la informática. En este contexto de la instrumentación astronómica, están mostrando su utilidad las fibras ópticas al elevar espectacularmente el rendimiento de la observación en algunos estudios.

Las fibras ópticas son conductos flexibles que permiten transmitir la luz. Su origen podría buscarse en los sistemas de canalización de la luz construidos para iluminar almacenes y minas subterráneas a finales del siglo pasado. Estos sistemas utilizaban tubos huecos, revestidos interiormente de un material reflectante, para transportar la luz. El principio era sencillo: una vez que los rayos de luz se introducían por un extremo del tubo, se propagaban en su interior, reflejándose cada vez que encontraban la superficie interna del mismo, hasta alcanzar el otro extremo. En las fibras ópticas modernas la luz se transmite de forma análoga. Mas para conseguir que los rayos de luz se re-

flejen en su interior éste se construye con dos tipos diferentes de vidrio o plástico. La parte más interna, llamada núcleo, tiene un índice de refracción superior al de la externa, o recubrimiento. En general, cuando la luz se propaga en un medio y encuentra otro de índice de refracción inferior, parte de la misma se refracta (se transmite en el medio de menor índice) y parte se refleja continuando su propagación al medio de índice mayor.

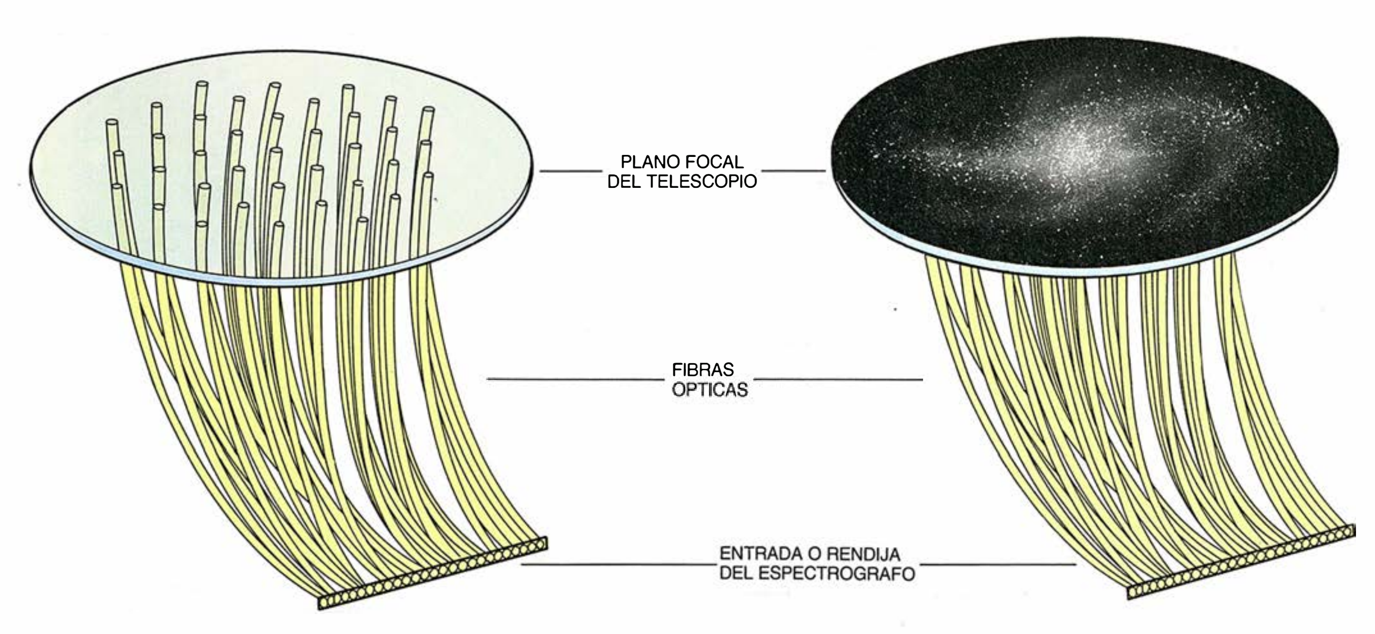
La proporción de luz reflejada depende exclusivamente del ángulo con el que incide la luz sobre la superficie de separación de los dos medios; a partir de un determinado ángulo, la reflexión es total. Por tanto, si introducimos un rayo de luz en el interior del núcleo de la fibra, de forma que las incidencias sobre la superficie que separa el núcleo del recubrimiento se produzcan con un ángulo igual o superior al de la reflexión total, éste se propagará por el núcleo de la fibra. Ni siquiera es necesario que exista una discontinuidad en el índice de refracción para que la luz se propague por el interior de una fibra. Algunas, las llamadas fibras de índice gradual, se construyen con un material cuyo índice de refracción disminuye de forma continua hacia el exterior. En el interior de estas fibras, los rayos de luz se propagan describiendo trayectorias sinusoidales.

Los primeros pasos hacia la incorporación de las fibras ópticas en la instrumentación astronómica los dieron, en la década de los setenta, Roger Angel y su grupo, de la Universidad de Arizona. Buscaban cómo transportar a un único instrumento, y mediante fibras ópticas, la luz re cogida por varios telescopios. Esto permitiría aumentar la superficie colectora de forma que, si no se produjesen pérdidas en la transmisión, observar con, por ejemplo, 10 telescopios de un metro cuadrado de superficie colectora, equivaldría a observar con un único telescopio de 10 metros cuadrados de superficie colectora. La ventaja era evidente, pues desde el punto de vista tecnológico la complicación y el coste a la hora de construir telescopios aumenta espectacularmente con su tamaño.

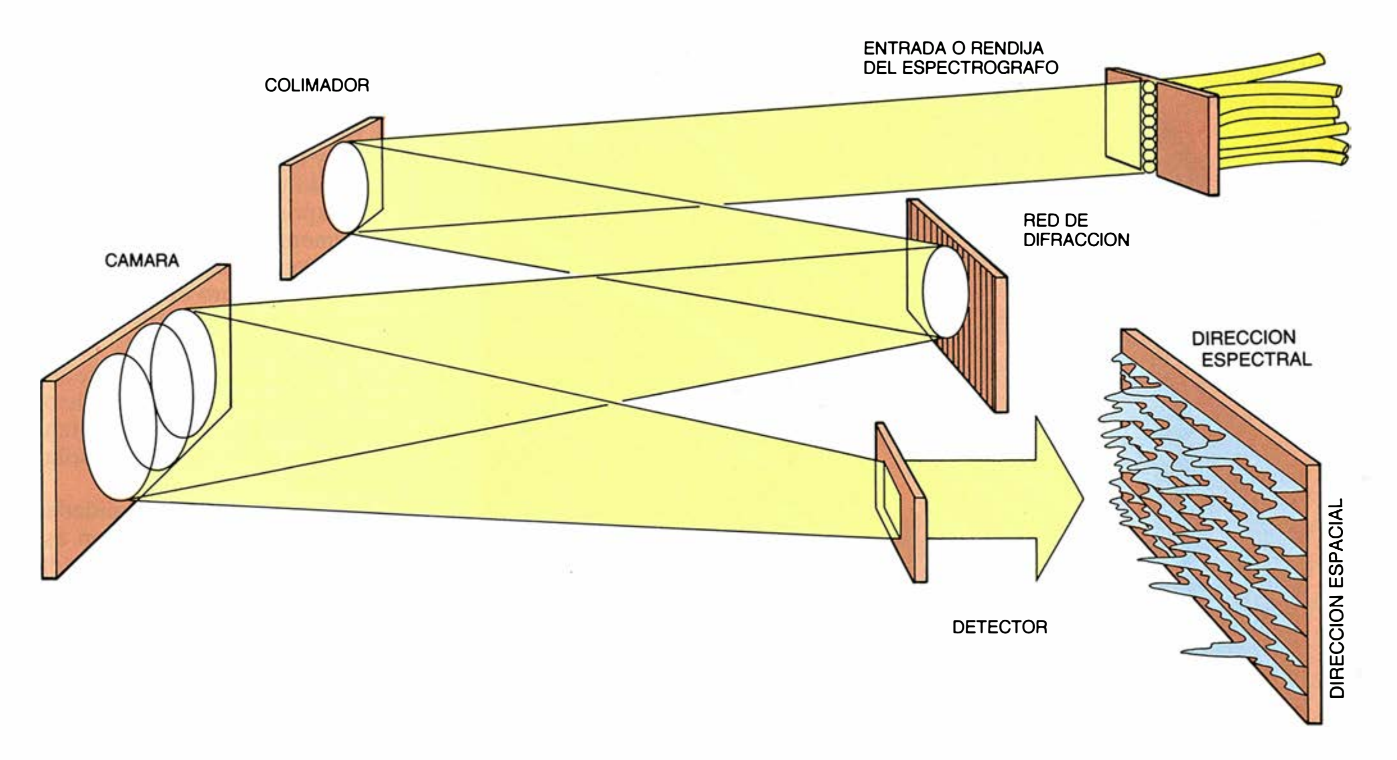
Para analizar las posibilidades prácticas del montaje, en 1979 el grupo de Angel realizó la primera observación astronómica utilizando una fibra óptica de 20 metros: transportaba la luz desde el foco de un telescopio hasta la entrada de un espectrógrafo. El resultado del ensayo fue positivo: quedó demostrado que, bajo algunas condiciones, no se producían pérdidas importantes en la transmisión. Comenzó a pensarse en las ventajas de las fibras ópticas, incluso trabajando con un solo telescopio. La conexión del foco del telescopio al instrumento, mediante una fibra óptica, ofrece la ventaja de poder aislar aquél y éste mecánicamente: el instrumento no tiene por qué estar acoplado al telescopio, el cual necesariamente debe moverse y estar a la temperatura ambiente, lo que permite mantener unas condiciones de estabilidad excepcionales. Esta idea se emplearía luego en varios observatorios especialmente con instrumentos destinados a medidas de velocidades radiales muy precisas de los objetos celestes. Cualquier cambio de orientación o temperatura en estos instrumentos puede alterar las mediciones obtenidas; por eso, se colocan aislados mecánicamente del telescopio, en habitaciones con la temperatura controlada, inyectándose la luz a los mismos a través de una fibra óptica.

En 1980, John Hill y colaboradores, del Observatorio de Steward, propusieron otra aplicación de las fibras que, sin duda, ha sido la que mayores éxitos ha cosechado. La idea básica consistía en conectar, mediante fibras ópticas, diferentes partes del plano focal del telescopio con la entrada de un espectrógrafo. Esto permitiría analizar espectralmente varios objetos de forma simultánea. Con la construcción de un instrumento, que llamaron MEDUSA, demostraron que sus ideas eran factibles, al realizar con el mismo espectroscopía simultánea de ocho galaxias. Pero veamos con más detalle el interés y el fundamento de este tipo de espectroscopía, llamada multiobjeto.

Cuando trabajamos con un espectrógrafo convencional sólo podemos



2. LAS FIBRAS OPTICAS modifican la distribución espacial real de los objetos que aparecen en una imagen, especialmente si éstos son tan sencillos como los que se dan en el plano focal de un telescopio. Para ello, se conecta un extremo de las fibras ópticas en el plano focal del telescopio en las posiciones de interés y se dispone el otro con la configuración espacial deseada. La modificación de la distribución espacial tiene interés cuando se trabaja con espectrógrafos convencionales, que sólo pueden analizar la luz de regiones unidimensionales o lineales. Estos transformadores ópticos pueden ser de dos tipos. Cuando se emplean para analizar varias regiones de un objeto extenso (espectroscopía bidimensional), la configuración en el plano focal es fija y suele estar definida atendiendo a las características de un grupo de objetos. Si se trata de analizar un conjunto de objetos puntuales (espectroscopía multiobjeto), las fibras deben presentar, para cada grupo de objetos, su correspondiente configuración en el plano focal.



3. EN UN ESPECTROGRAFO CONVENCIONAL una de las dos dimensiones de su detector se utiliza como dirección espectral; es decir, sobre ella se registran las intensidades recibidas en las diferentes longitudes de onda. Por tanto, queda una única dimensión del detector para registrar información espacial. En razón de ello, se coloca, a la entrada del espectrógrafo, una rendija para dejar pasar la luz de una región unidimensional o lineal. Sin embargo, y gracias a transformadores construidos con fibras ópticas, podemos iluminar la rendija con luz recibida en diferentes zonas del plano focal. El número de fibras ópticas que son adaptables a un espectrógrafo o, de manera equivalente, el número de objetos o regiones que pueden observarse simultáneamente, ha venido oscilando entre treinta y setenta en los sistemas que se han diseñado y construido hasta la fecha.

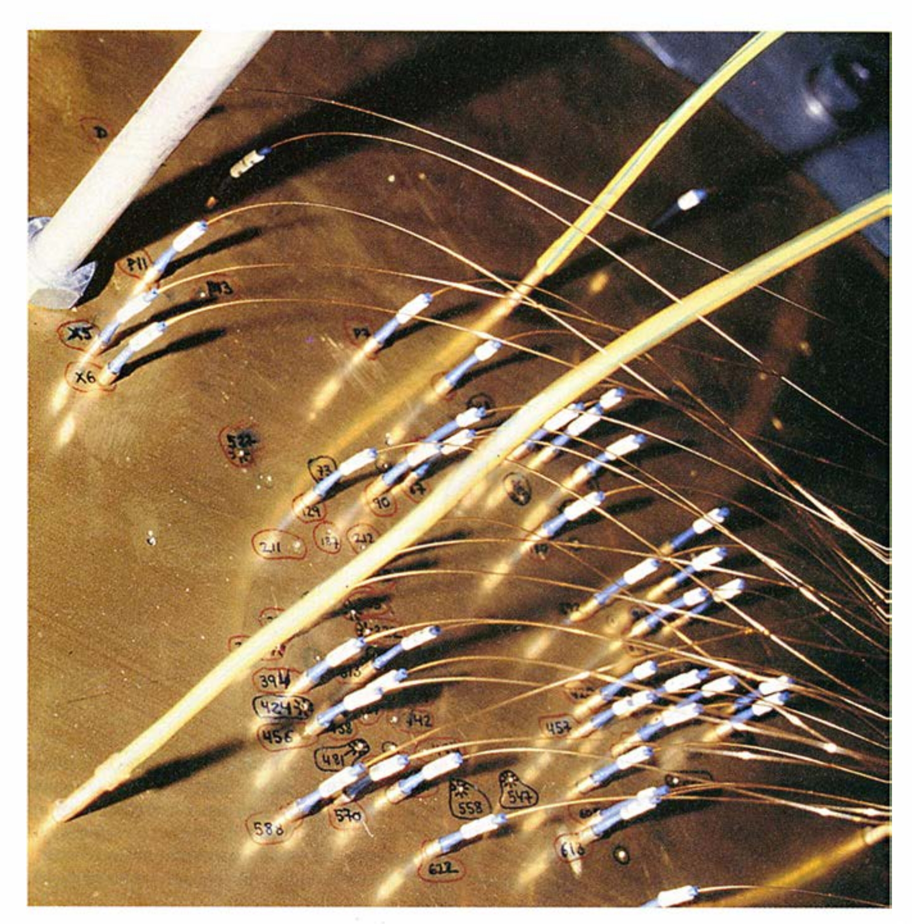
descomponer y analizar la luz de zonas unidimensionales o lineales. Esta limitación se debe a que una de las dos dimensiones del detector se utiliza como dirección espectral, sobre la cual se distribuyen las diferentes longitudes de onda, quedando, por tanto, una única dimensión para registrar información espacial. En consecuencia, un espectrógrafo convencional no puede analizar simultáneamente toda la luz recibida en el plano focal del telescopio; al ser éste bidimensional, nos vemos obligados a escoger un corte unidimensional del mismo, donde debemos colocar la rendija o entrada del espectrógrafo. Esta limitación restringe enormemente el número de objetos que pueden analizarse espectralmente de forma simultánea. En la práctica la observación espectroscópica de varios objetos con un espectrógrafo convencional se realiza de forma secuencial, aun cuando todos los objetos estén en el plano focal del telescopio.

Pero las fibras pueden reordenar o modificar la distribución espacial de los objetos que aparecen en una imagen; en especial, si éstos son tan sencillos como los que suelen encontrarse en el plano focal de un telescopio. Esta reordenación o modificación se consigue conectando los extremos de un conjunto de fibras sobre la imagen real, o parte de la misma, y disponiendo el otro extremo con la configuración espacial deseada. En nuestro contexto, el interés de esta capacidad de las fibras reside en poder transformar la distribución real y bidimensional de los objetos (en el plano focal) a una distribución unidimensional o lineal. Esta nueva disposición de los objetos permite que sean analizados simultáneamente por un espectrógrafo. Esta aplicación tiene interés en trabajos que requieren la observación de un gran número de objetos que aparecen agrupados. Es el caso de los estudios realizados en cúmulos estelares y de galaxias.

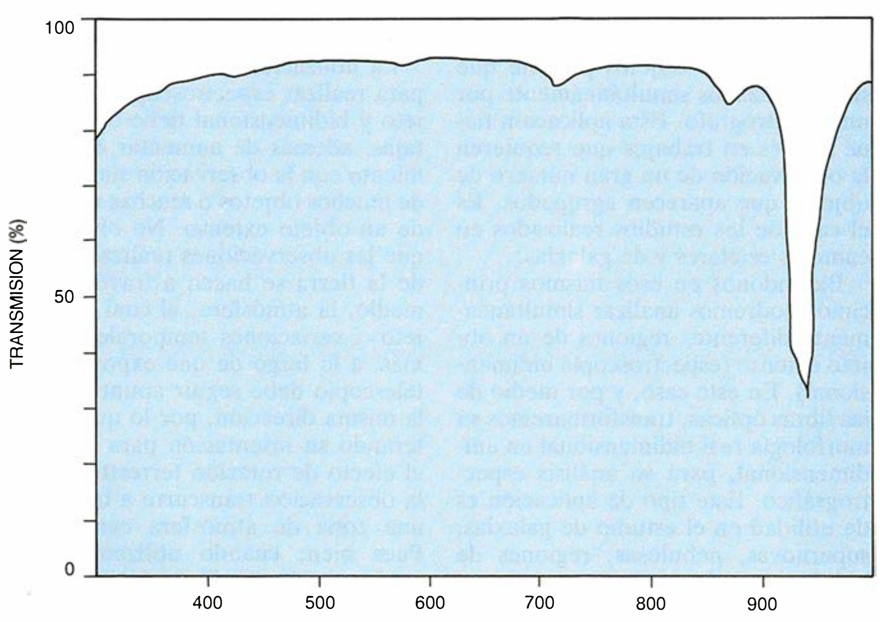
Basándonos en esos mismos principios podremos analizar simultáneamente diferentes regiones de un objeto extenso (espectroscopía bidimensional). En este caso, y por medio de las fibras ópticas, transformaremos su morfología real bidimensional en unidimensional, para su análisis espectrográfico. Este tipo de aplicación es de utilidad en el estudio de galaxias, supernovas, nebulosas, regiones de hidrógeno ionizado, etcétera.

Evidentemente, cuantas más fibras podamos utilizar mayor será el número de objetos o regiones que pueden ser observados a la vez, pues cada fibra transporta la radiación de cada uno de ellos. Pero hay límites prácticos al número de fibras que admite un espectrógrafo. Factores muy diversos, relacionados con el diseño óptico del espectrógrafo y con las características de los detectores empleados en astrofísica, determinan dicho número, que ha oscilado entre 30 y 70 para la mayoría de los sistemas de espectroscopía multifibra construidos hasta ahora.

La utilización de las fibras ópticas para realizar espectroscopía multiobjeto y bidimensional tiene otras ventajas, además de aumentar el rendimiento con la observación simultánea de muchos objetos o muchas regiones de un objeto extenso. No olvidemos que las observaciones realizadas desde la tierra se hacen a través de un medio, la atmósfera, el cual está sujeto a variaciones temporales. Además, a lo largo de una exposición el telescopio debe seguir apuntando en la misma dirección, por lo que va alterando su orientación para corregir el efecto de rotación terrestre y, así, la observación transcurre a través de una zona de atmósfera cambiante. Pues bien, cuando utilizamos una configuración con fibras ópticas como las comentadas arriba, todos los objetos o zonas de un objeto extenso se observan bajo las mismas condiciones atmosféricas, lo cual facilita el análisis posterior de los resultados. Además, la resolución de un espectrógrafo depende directamente de la distribución



4. EN ESPECTROSCOPIA MULTIOBJETO es necesario colocar las fibras ópticas en el plano focal con una precisión de decenas de micra. Para ello hay que conocer las coordenadas en el cielo de las estrellas u objetos a observar con poco error y construir placas que se taladren teniendo en cuenta las aberraciones producidas por la óptica del telescopio, posibles movimientos propios, efectos de dilatación y contracción, etcétera. En estos taladros se sitúan las fibras ópticas; con ayuda de conectores, se fijan en las posiciones adecuadas. Algunos sistemas utilizan robots que pueden mover sobre el plano focal un extremo de las fibras ópticas hasta conseguir la posición deseada.



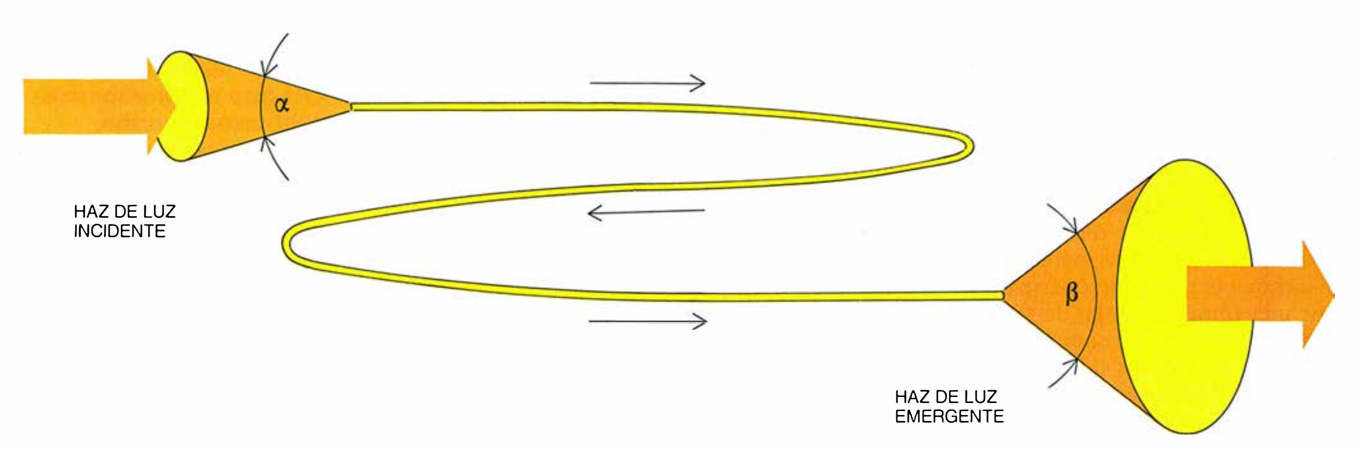
5. EFICACIA DE LA TRANSMISION (*porcentaje*) en función de la longitud de onda dada en nanómetros. Las fibras ópticas de sílice transmiten bien en el rango visible, como se muestra para el caso de una de tres metros. En torno a 950 nanómetros aparecen unas fuertes bandas de absorción debidas al dopante hidroxilo (OH) utilizado en su construcción. Las fibras "secas" tienen una menor proporción de OH, lo que las hace más transparentes en el infrarrojo cercano sacrificando su transmisión en el ultravioleta. Las fibras "húmedas" poseen, por contra, mayor proporción de contaminante OH, por lo que muestran peores transmisiones en el infrarrojo y mejores en el ultravioleta.

de intensidades del objeto en la rendija o entrada del mismo. En un espectrógrafo convencional esta distribución varía con las condiciones atmosféricas y la estabilidad del guiado del telescopio durante el tiempo que dura la exposición. Sin embargo, cuando alimentamos un espectrógrafo por medio de una fibra óptica, debido al gran número de reflexiones que tienen lugar en su interior, la distribución de intensidad a la salida ofrece un perfil independiente de los factores comentados arriba (condiciones atmosféricas y guiado) y, por tanto, permite la observación a resolución constante.

Para aprovechar estas posibilidades que ofrecen las fibras ópticas en astrofísica, conocidas a principio de la década de los años ochenta, hay que resolver nuevos problemas de índole práctica, que serán posteriormente analizados. De manera paralela se ha ido desarrollando un trabajo básico, orientado a estudiar las propiedades y características de diferentes tipos de fibras con el fin de seleccionar las más adecuadas para esta aplicación. En general, las propiedades exigidas a las fibras para su aplicación en astrofísica son diferentes de las requeridas en telecomunicaciones. En aquéllas resulta muy importante reducir las pérdidas por observaciones internas en bandas espectrales relativamente estrechas, mientras que en astrofísica, al emplearse fibras de menor longitud, la transmisión no es el parámetro más crítico. Como veremos hay otros factores más relevantes. Las empleadas en astrofísica son fibras de sílice, multimodo y con índice de refracción discontinuo, por razones que se verán más adelante.

El primer problema que surge en espectroscopía multiobjeto con fibras ópticas es el de colocarlas en las posiciones exactas que ocupan los objetos en el plano focal. Debido a la difracción producida por el telescopio y, sobre todo, al efecto de la atmósfera terrestre, la distribución de intensidad en el plano focal de una estrella u otro objeto no resuelto no es exactamente puntual, sino que cubre una pequeña zona espacial. Esta pequeña zona donde se encuentra la mayor parte de la intensidad procedente de la estrella, conocida con el nombre de disco de visión ("seeing"), tiene unas dimensiones angulares en torno a 1 segundo de arco, lo que implica, para un telescopio estelar típico, unas dimensiones espaciales de unos 0,2 milímetros de diámetro.

Para evitar que la fibra transmita radiación procedente del fondo del cielo que rodea al objeto, debemos



6. EFECTO DE LA DEGRADACION DE LA RAZON FOCAL, inducido por las fibras. Adquiere importancia cuando éstas se utilizan en espectroscopía astronómica. Debido a este efecto, el haz de luz a la salida de la fibra diverge más rápidamente que cuando la propagación es directa. Dado que la salida de la fibra óptica ilumina un colimador, cuanto mayor sea la degradación de la razón focal, tanto mayores serán las dimensiones de éste para recoger toda la luz. Esto complica el diseño del espectrógrafo, que debe tener en cuenta las dimensiones de los detectores disponibles.

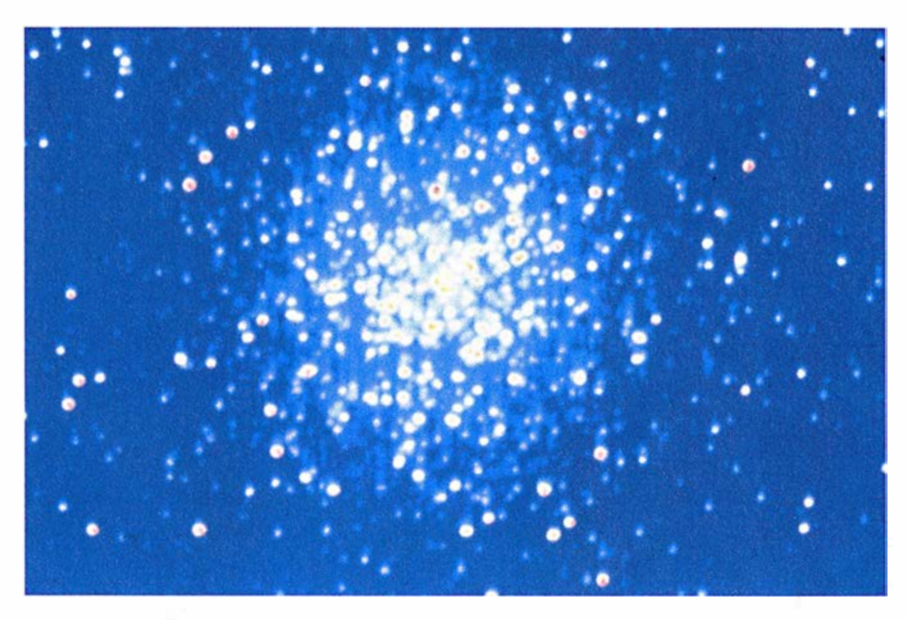
ajustar el diámetro de su núcleo al del disco de visión. Ello nos obliga a emplear fibras multimodo de unas pocas décimas de milímetro de diámetro. Además, el diámetro de las fibras debe ser de ese orden de magnitud para conseguir una resolución espectral adecuada para la mayoría de las aplicaciones en astronomía. No es fácil acoplar en el plano focal fibras de este diámetro. Se exige conocer con precisión las posiciones que ocupan los objetos en el plano focal y, luego, instalar las fibras ópticas con escasas decenas de micra de error. Imprecisiones en las medidas astrométricas de los objetos, sus posibles movimientos propios, aberraciones producidas por el telescopio, la refracción atmosférica y efectos de dilatación y compresión causados por cambios de temperaturas son algunos de los motivos que pueden atentar contra la eficacia de ese acoplamiento.

Los primeros sistemas utilizaban una placa metálica, taladrada en las posiciones de las estrellas, conocidas de antemano gracias a una fotografía tomada con el telescopio; las fibras ópticas se pegaban en la placa metálica. El proceso resultaba bastante engorroso y muy poco flexible: había que repetir todas las operaciones en cada campo a observar. En 1984 Peter Gray, del Observatorio Anglo-australiano, presentó el sistema FOCAP ("Fiber Optics Coupled Aperture Plate"). En este sistema se sustituía el pegamento por unos conectores, lo que posibilitaba que el mismo haz de fibras se aprovechara en diferentes campos; bastaba con cambiar las placas metálicas.

Hoy las placas se construyen en máquinas guiadas por ordenador, que corrige los efectos de dilatación y compresión, de aberraciones por la óptica del telescopio y otros.

El sistema MX, presentado en 1986 por John Hill y colaboradores, del Observatorio de Steward, propone una tercera vía para resolver el problema del acoplamiento de las fibras en el plano focal. Este sistema consta de 32 robots independientes para mover y colocar otras tantas fibras ópticas sobre el plano focal del telescopio. Prototipos de sistemas de este tipo manejan simultáneamente del orden de 50 fibras, que colocan en sus posiciones en unos pocos minutos. Estos sistemas, gracias a su flexibilidad, permiten variar cómodamente el campo de observación y corregir los efectos derivados de una mala astrometría del campo, de movimientos propios, de refracción atmosférica, etcétera.

El problema de situar las fibras en el plano focal se reduce cuando se realiza espectroscopía simultánea de muchas regiones de un objeto extenso, es decir, espectroscopía bidimensional. Para esta aplicación se construyen haces de fibras con una determinada configuración espacial fija en el extremo que se conecta al plano focal del telescopio. Esa configuración espacial se suele definir de acuerdo con las características de un conjunto de objetos. Para no perder información sobre la estructura morfológica de los objetos, el muestreo espacial o, en otras palabras, la separación entre

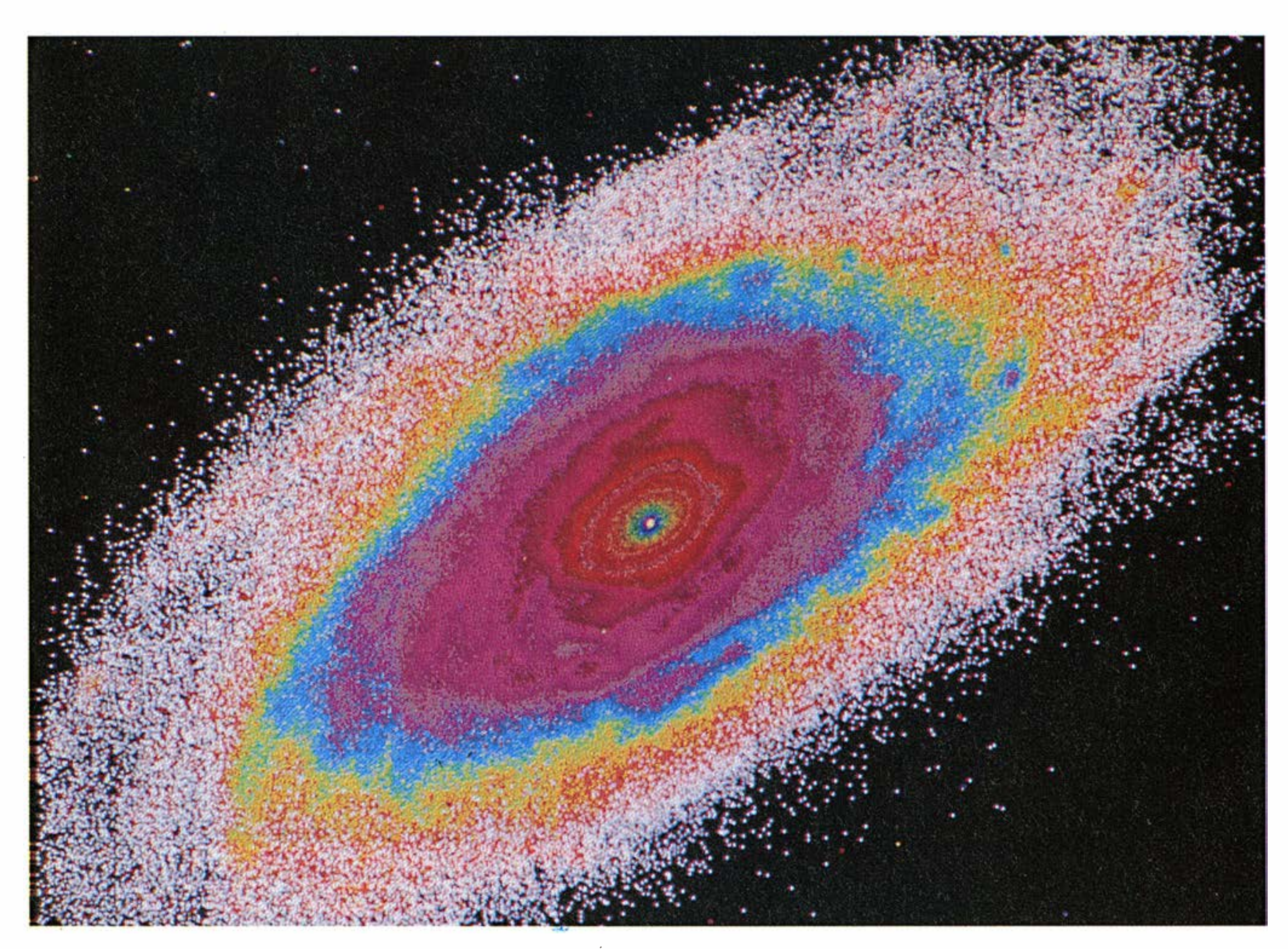


7. ALGUNOS ESTUDIOS sobre cúmulos estelares o cúmulos de galaxias pueden abordarse gracias a espectrógrafos equipados con fibras ópticas. Acometidos con instrumentos convencionales, necesitan una gran cantidad de tiempo de observación. En estos casos, los objetos de interés, en gran número, aparecen agrupados en el plano focal del telescopio; por tanto, su luz se puede descomponer espectralmente de forma simultánea, gracias a la utilización de transformadores construidos con fibras ópticas. Y no sólo se aumenta el rendimiento en la observación, sino que también se garantiza que todos los objetos se analicen bajo las mismas condiciones atmosféricas. En la fotografía se muestra el cúmulo globular M3 (imagen obtenida y procesada por C. Martínez Roger y E. Páez).

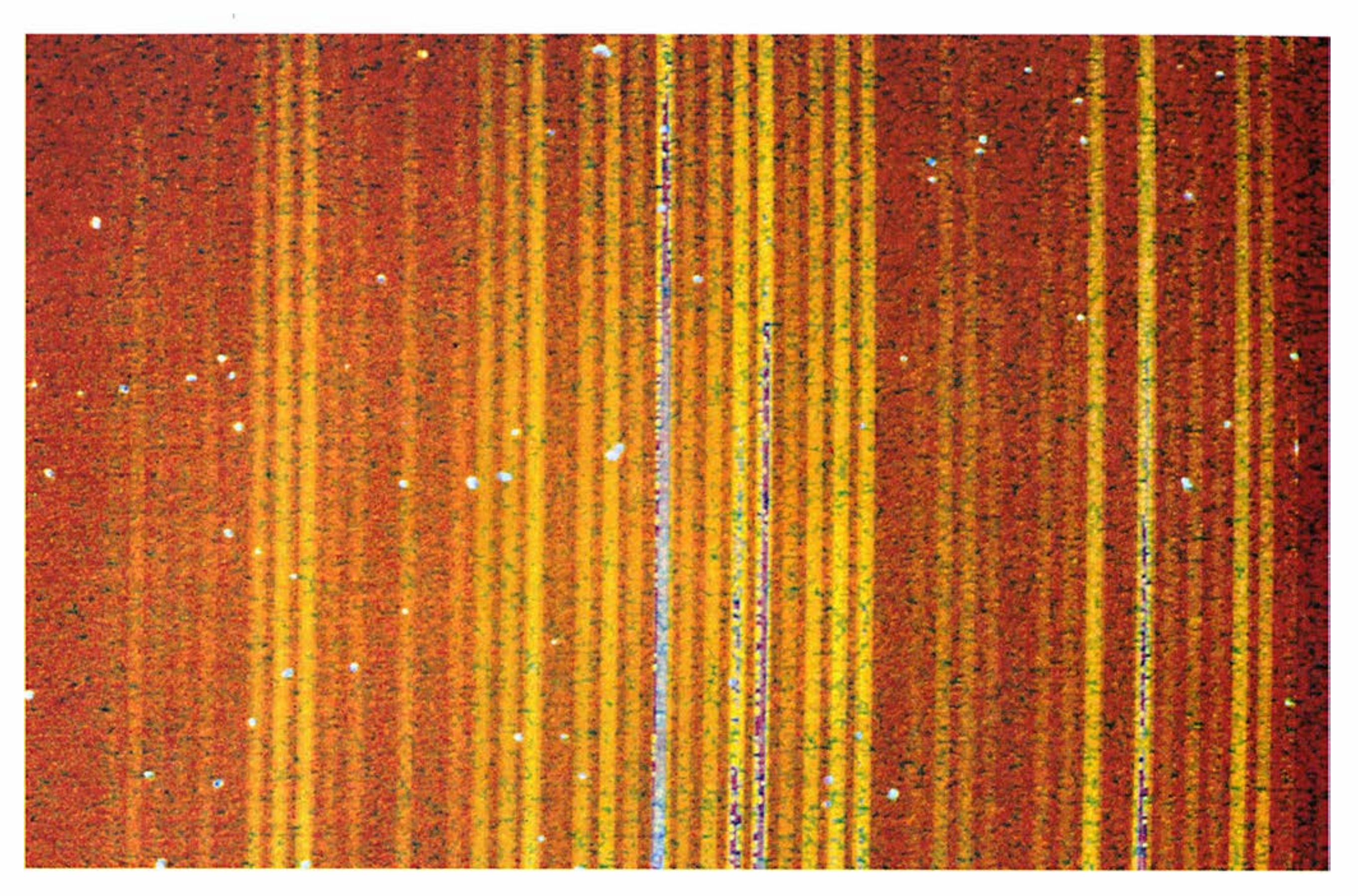
fibras colaterales debe ser del orden del radio del disco de visión. Esto obliga a utilizar paquetes compactos de fibras que, para abarcar zonas bidimensionales de suficiente extensión, exigen un número muy elevado de fibras. Para conseguir un buen guiado del telescopio durante una exposición, o, en otras palabras, para evitar que la radiación que se propaga por una fibra provenga de diferentes partes del objeto, se conecta, a través de haces compactos de fibras, varias estrellas brillantes que aparecen en el plano focal del telescopio con el fotocátodo de un sistema de televisión. Cualquier movimiento relativo entre el objeto en estudio y el haz de fibras (debido a cambios en el apuntado del telescopio) afecta también a las estrellas brillantes y se traduce en una variación de intensidad en la pantalla de televisión, lo que nos permite corregir la posición del telescopio.

Una vez introducida la luz en el interior de las fibras, se propaga por el interior de las mismas. Aunque la cantidad de luz transmitida depende de las características de la fibra empleada, suele superar el 90 por ciento para fibras de sílice con longitudes de entre 1 y 10 metros y en el rango espectral desde 400 hasta 900 nanómetros. Una de las razones por las que la transmisión resulta tan alta es porque los rayos de luz procedentes del telescopio inciden con un ángulo adecuado para que las reflexiones internas sean muy eficientes. Menor rendimiento se consigue en la zona más azul del espectro electromagnético y en algunas bandas del infrarrojo. Cuando se opera en uno de esos rangos espectrales se eligen fibras que, sacrificando su transmisión en uno de ellos, mejore su comportamiento en el otro. La cantidad de contaminante hidroxilo (OH), empleado en la construcción de la fibra, permite modificar la transmisión en estas zonas. Así, las fibras "húmedas" consiguen mejores transmisiones en el ultravioleta cercano; por tales se entiende aquellas a las que, durante el proceso de fabricación, se les aumenta la proporción de OH. Como contrapartida, este radical produce unas fuertes bandas de absorción en 950 nanómetros. Lo contrario ocurre con las fibras "secas", a las que se disminuye la proporción de OH para mejorar su transmisión en el infrarrojo cercano.

La conexión entre la salida de la fibra y el espectrógrafo suele resultar bastante ineficiente. Esto es debido a que en el interior de las fibras se produce un efecto conocido con el nombre de "degradación de la razón focal". Como consecuencia de este efecto, el haz de luz a la salida de la fibra diverge más rápidamente de lo que lo haría si se hubiese propagado en el aire. Este efecto es más acusado cuando se trabaja con razones focales "lentas" (haces de luz que convergen o divergen lentamente), y se comprende su importancia si tenemos en cuenta que la salida de la fibra se coloca en el foco del primer componente óptico del espectrógrafo, que es una lente o un espejo colimador. Si la razón focal se degrada, las dimensiones de este componente deben ser grandes para poder recoger toda la luz, lo que complica el diseño del espectrógrafo. Otra opción es utilizar colimadores de menor distancia focal,



8. GALAXIAS, SUPERNOVAS Y NEBULOSAS PLANETARIAS son ejemplos de objetos que muestran una estructura bidimensional sobre el plano focal del telescopio. Esta estructura bidimensional puede analizarse espectralmente en una única exposición gracias a la utilización de espectrógrafos equipados con fibras ópticas. En la figura se presenta la galaxia NGC 2841, donde en falso color se han codificado los diferentes niveles de intensidad, realzando su estructura. La imagen ha sido obtenida y procesada por M. Prieto y A. Varela, del Instituto de Astrofísica de Canarias.



9. IMAGEN CCD (de "Charged Coupled Device"), obtenida con un espectrógrafo equipado con fibras ópticas. Sobre la dirección vertical se registran las intensidades correspondientes a las diferentes longitudes de onda; sobre la dirección horizontal se distribuyen las 50 fibras ópticas.

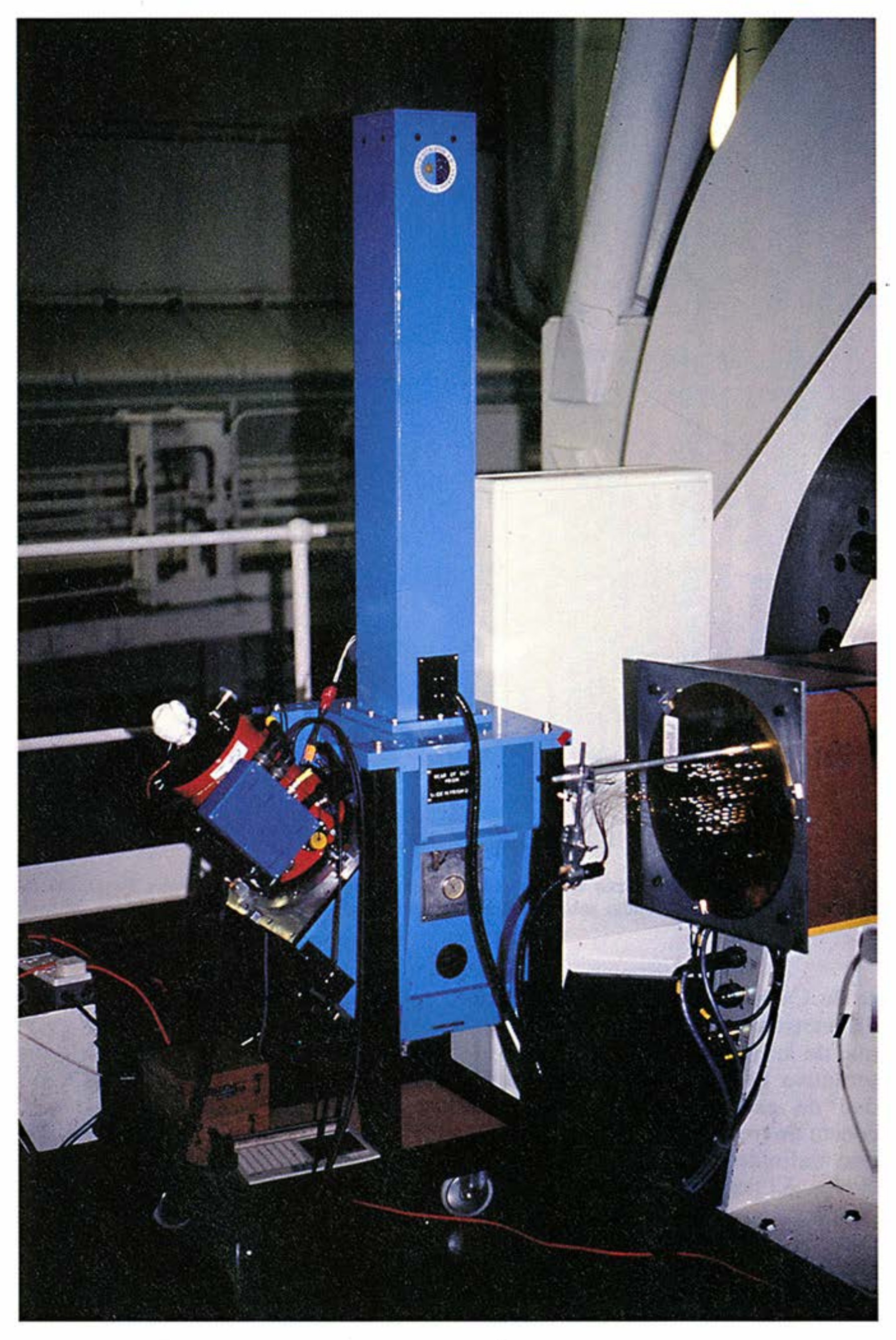
pero esto dificulta obtener una resolución espectral aceptable. En cualquier caso, el rendimiento global del sistema está en relación inversa con la degradación de la razón focal producida por las fibras. Hay muchos factores que influyen en la magnitud de la degradación de la razón focal, como el perfil del índice de refracción en la estructura de la fibra, la calidad del pulido de las caras externas, las presiones a las que están sujetas en los bordes, la geometría que adquieren las propias fibras, etc. Porque las fibras de índice de refracción gradual degradan en una mayor proporción la razón focal, se prefieren fibras de índice de refración discontinuo.

Los sistemas de fibras ópticas han de vencer otro obstáculo: su poca versatilidad a la hora de modificar la configuración de observación. Cuando se realiza espectroscopía bidimensional, interesa poder modificar la configuración espacial de las fibras en el plano focal; lo mismo en este caso que en espectroscopía multiobjeto conviene poder variar la resolución espectral en función de las características del objeto y las condiciones atmosféricas. El sistema HEXAFLEX, construido en 1989 por José Luis Rasilla, Evencio Mediavilla y el autor de este artículo en el Instituto de Astrofísica de Canarias, para el telescopio de 4,2 metros del Observatorio del Roque de los Muchachos, ofrece una alternativa para aumentar la versatilidad de estos sistemas. El sistema consta de tres haces de 61 fibras, cada uno definido para diferentes aplicaciones. El acoplamiento entre los haces de fibras y el espectrógrafo es tal que pueden ser intercambiados, por lo que es posible modificar el modo de observación (multiobjeto/bidimensional) y la resolución espacial y espectral de manera rápida y estable.

Los resultados obtenidos hasta la fecha con espectrógrafos equipados con fibras ópticas y destinados a la espectroscopía multiobjeto o bidimensional han sido prometedores. Baste un par de ejemplos. En 1989, un grupo de astrónomos del Observatorio Europeo del Hemisferio Sur (ESO) realizaron espectroscopía de más de 700 galaxias en el corto espacio de cuatro noches. Para ello utilizaron el sistema OCTOPUS, diseñado para realizar espectroscopía multiobjeto y equipado con 52 fibras, y cuya última versión fue presentada en 1989 por Gerardo Avila, de ESO. En 1990, y utilizando el sistema HEXAFLEX, hemos registrado en sólo una noche más de 600 espectros correspondientes a diferentes zonas de un grupo de tres galaxias. Para acometer este tipo de observaciones con instrumentos convencionales hubiera sido necesario un factor entre 10 y 20 veces más de tiempo de observación, estando más expuestos a inestabilidades e inhomogeneidades de todo tipo.

Ganancia tan alta aparece sólo cuando los objetos de interés se agrupan de forma adecuada en el plano focal, o cuando se desea realizar espectroscopía bidimensional de objetos que tienen un cierto rango de tamaño. Fuera de estas situaciones la espectroscopía óptica con sistemas de fibras puede resultar menos rentable que la realizada con espectrógrafos tradicionales. La observación de un objeto puntual resulta más eficiente con los sistemas habituales que recurriendo a las fibras. Lo mismo sucede con objetos extensos, si no se requiere información bidimensional.

Son muchos los programas que se benefician ya del uso de espectrógrafos equipados con fibras, gracias a los cuales se acometen observaciones impensables hace pocos años por su elevadísimo coste en tiempo de observación: mediciones sistemáticas de corrimiento al rojo cosmológico en cúmulos de galaxias, abundancias químicas de estrellas pertenecientes a



10. ESPECTROGRAFO FLEX (de "Fiber Linked Experimental Spectrograph") construido en el Instituto de Astrofísica de Canarias en colaboración con el Real Observatorio de Greenwich, para el telescopio William Herschell de 4,2 m del Observatorio del Roque de los Muchachos (La Palma).

cúmulos globulares, medidas de velocidades y parámetros físicos en la zona más interna de galaxias activas y cuásares, son ejemplos de programas para los que los sistemas multifibra parecen la mejor opción.

El futuro de estos instrumentos resulta prometedor. En primer lugar, son continuos los progresos para superar los problemas derivados del acoplamiento de las fibras en el plano focal, así como los orientados a evitar los efectos de la degradación de la razón focal. El desarrollo de detectores bidimensionales CCD ("Charged Coupled Device") de gran formato puede aumentar por un factor 2 o 3 el número de fibras adaptables a estos sistemas. A esto hay que unir la construcción de espectrógrafos de nuevo diseño, capaces de admitir este mayor número de fibras. El diseño de grandes telescopios para su empleo específico con fibras ópticas constituye otra realidad. La óptica de estos telescopios está optimizada para conseguir un gran campo de visión exento de aberraciones y escalas lineales del plano focal adecuadas para su utilización con fibras. El telescopio de rastreo espectroscópico SST ("Spectroscopic Survey Telescope"), propuesto en 1988 por Lawrence Ramsey, se enmarca en este contexto.

Otras aplicaciones de las fibras en astrofísica –pensemos en su uso en fotometría e interferometría visible o espectrometría infrarroja–, pueden revestir también gran interés en un futuro no muy lejano. En el ámbito de la interferometría en el rango visible, las fibras ópticas ofrecen la posibilidad de combinar coherentemente la luz recogida por un conjunto de pequeños telescopios; se emplean fibras monomodo, con un núcleo de diámetro entre 4 y 10 micras, que puede ser del orden del tamaño del disco de visión cuando se trabaja con telescopios de pequeña apertura.

En fotometría astronómica a través de fibras ópticas, la idea es similar a la que subyace en espectroscopía multiobjeto: las fibras transportan la luz de los objetos de interés desde el plano focal del telescopio a la entrada de un fotómetro equipado con varios detectores o con un detector bidimensional. Pero en este caso pueden utilizarse las dos dimensiones del detector para distribuir los objetos; gracias a ello, el número de objetos que pueden observarse simultáneamente es elevadísimo. Pero esta aplicación tiene un inconveniente: la baja calidad fotométrica de las fibras ópticas. Las variaciones en la configuración geométrica de las fibras, tensiones sobre las mismas y, sobre todo, variaciones de la posición de la imagen del objeto sobre el núcleo atentan contra el rendimiento de la transmisión.

Por último, la posibilidad de aplicar los conceptos y técnicas desarrolladas en el rango visible en el infrarrojo cercano constituye ya una realidad gracias a los detectores bidimensionales sensibles en esta región del espectro electromagnético. Se han desarrollado fibras de fluoruro de circonio y vidrios calcogénidos de una altísima transmisión de hasta 4 micras, con aceptables niveles de flexibilidad. La necesidad o no de enfriar las fibras, la forma de minimizar la radiación infrarroja de fondo y otros problemas permanecen abiertos a la investigación.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE FIBER LIGHTGUIDE. A. G. Chynoweth en *Readings from Physics Today*, pág. 218, American Institute of Physics, 1976.

APPLICATION OF OPTICAL FIBERS TO ASTRONOMICAL INSTRUMENTATION. J. R. Powell en *Instrumentation in Astronomy*. Proceedings of SPIE; vol. 445, pág. 77, 1983.

FIBER OPTICS IN ASTRONOMY. Editado por S. Bardem. *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, vol. 3; 1988.

La aspirina

Considerada tiempo atrás la quina de Europa, se están ya desentrañando los mecanismos por los que ese fármaco y sus análogos consiguen tan amplia gama de efectos

Gerald Weissmann

Existe un árbol inglés cuya corteza, según he comprobado empíricamente, es un poderoso astringente y muy eficaz para curar las enfermedades agudas y recurrentes.

—Reverendo Edmund Stone, de Chipping-Norton, en el condado de Oxford, en una carta dirigida al Muy Honorable George, conde de Macclesfield, presidente de la Sociedad Real, 25 de abril de 1763.

Stone había descubierto, aunque él no lo sabía, que los salicilatos —derivados del ácido salicílico— rebajaban la fiebre y aliviaban las molestias producidas por diversas enfermedades agudas acompañadas por escalofríos. La corteza del sauce (*Salix alba*) debe su efecto astringente a un elevado contenido de salicina, el glucósido del ácido salicílico. El salicilato de uso más común es el ácido acetilsalicílico, mejor conocido por su nombre comercial de "aspirina", de la que en España se consumen 700 millones de comprimidos al año.

Tal y como observó Stone, estos compuestos presentan una amplia gama de efectos. A dosis bajas —menos de una tableta al día—, la aspirina puede utilizarse para tratar y prevenir el infarto de miocardio y para prevenir la trombosis cerebral. Para reducir el dolor y la fiebre son eficaces de dos a seis tabletas diarias (entre 1 y 3 gramos). Y dosis mucho mayores (entre 4 y 8 gramos al día) reducen la inflamación de las articulaciones en enfermedades como la fiebre reumática, la gota o la artritis reumatoide.

La aspirina y los salicilatos ejercen otros efectos fisiológicos, relacionados sólo algunos de ellos con su uso clínico. Los salicilatos pueden hacer desaparecer los callos de los dedos, provocan la eliminación de ácido úrico por el riñón y destruyen las bacterias *in vitro*. La aspirina inhibe la coagulación de la sangre, induce la aparición de la úlcera péptica y promueve la retención de líquidos en los riñones.

Los biólogos celulares utilizan la aspirina y los salicilatos para inhibir el transporte de iones a través de la membrana celular, bloquear la activación de los leucocitos de la sangre e impedir la síntesis de adenosín trifosfato, un compuesto energético, en mitocondrias aisladas. La investigación recurre a estas sustancias para activar los genes que determinan las proteínas del choque de calor en los cromosomas plumulosos de *Drosophila*, la mosca del vinagre. Con salicilatos, por último, los botánicos estimulan la floración de *Impatiens*, la azucena y otras plantas.

La amplísima gama de efectos que presenta la aspirina complica la tarea de desentrañar los mecanismos bioquímicos subyacentes en dichos efectos. Los biólogos no elaboraron, hasta principios de los años setenta, una hipótesis para explicar la acción de la aspirina y fármacos relacionados como el ibuprofeno, la indometacina y el piroxicam. Tal hipótesis se basaba en la capacidad de esas drogas para bloquear la síntesis de prostaglandinas, hormonas celulares que intervienen en los procesos del dolor y la inflamación.

Más recientemente se ha puesto de manifiesto que la hipótesis de las prostaglandinas explica sólo algunos de los efectos de la aspirina y las sustancias afines. Su crucial poder antiinflamatorio no descansa meramente en la inhibición de las prostaglandinas, sino también en su capacidad para alterar algunas interacciones en el interior de la membrana celular. En este sentido, las investigaciones llevadas a cabo en mi laboratorio han mostrado que los compuestos relacionados con la aspirina impiden la activación de las células implicadas en las primeras fases de la inflamación aguda.

La historia de cómo los extractos de la corteza del sauce llegaron desde los enfermos agudos del condado de Oxford hasta el banco del laboratorio se puede resumir con las cuatro "ges" de Paul Ehrlich: *Geduld, Geschick, Geld und Glück* (paciencia, habilidad, dinero y suerte). En el caso del reverendo Stone, la suerte pareció estar de su lado.

Hacia 1757, Stone probó la corteza de sauce (por entonces un remedio popular muy extendido) y se sorprendió por su fuerte sabor amargo. El parecido con el sabor de la corteza de la quina (*Cinchona*) —un raro y caro remedio para las enfermedades agudas— estimuló la perspicacia de Stone. Seis años de cuidadosas observaciones clínicas culminaron en su carta a la Sociedad Real. Proponía en ella una hábil justificación del uso de la corteza para enfermedades febriles; basábase en la doctrina tradicional según la cual "muchas enfermedades naturales llevan su cura consigo, o su remedio no dista mucho de sus causas". Los sauces, como las enfermedades febriles, abundaban en los condados húmedos.

Medio siglo después, movidos por una rivalidad nacional, farmacólogos franceses y germanos competían por

GERALD WEISSMANN es profesor de medicina en la Universidad de Nueva York y director de la división de reumatología de su hospital clínico, donde investiga en el campo de la biología molecular de la inflamación. Tras recibir el doctorado realizó cursos de especialización bioquímica en la Universidad de Nueva York y de biología celular en el Laboratorio de Investigación Strangeways de Cambridge. Ha sido presidente del Colegio Estadounidense de Reumatología y de la Sociedad Harvey.

descubrir el principio activo de la corteza del sauce. Hacia 1828, en el Instituto Farmacológico de Munich, Johann A. Buchner aislaba una pequeña cantidad de salicilato en forma de cristales aciculares amarillos y amargos al paladar. Un año más tarde, en París, H. Leroux mejoraba la técnica de extracción y conseguía unos 30 gramos de salicina a partir de casi kilogramo y medio de corteza. En 1833, E. Merck, farmacólogo de Darmstadt, obtenía una preparación pura de salicina por la mitad de precio que los extractos impuros de sauce. Hasta 1838, no le daría Raffaele Piria, de Pisa, investigando en París, el nombre por el que se le conoce hoy en día: *l'acide salicylique*, o ácido salicílico.

Otras plantas resultaron ser también fuentes naturales ricas en salicilatos. La reina de los prados (*Spiraea ulmaria*) producía grandes cantidades de un aceite soluble en éter; el químico suizo Karl Jacob Löwig lo aprovechaba para cristalizar el *Spirsäure* en 1835. En 1839, Dumas demostró que el *Spirsäure* de Löwig no era sino *l'acide salicylique* de Piria. Otro farmacólogo galo, Auguste Cahours, demostró en 1844 que el aceite de la gaulteria —un remedio tradicional para los trastornos agudos— contenía el éster metílico del ácido salicílico.

Ocurría así en la química del siglo XIX: franceses y británicos iban por delante de los alemanes en el estudio de los productos naturales, pero éstos llevaban ventaja en el conocimiento de los procesos de síntesis. Forzados a competir con las industrias francesas y británicas, que abastecían los telares de Lyons y Macclesfield con pigmentos importados de las colonias de ultramar, los alemanes replicaban inventando tintes de anilina baratos. Así levantaron, entre otros, el emporio de la I. G. Farben. Hacia mediados de la década de los setenta del siglo pasado, la química sintética germana iba a la cabeza del mundo. Si diez años antes no se exportaba ningún tinte germano, en 1888 ese sector industrial abastecía a más del 80 por ciento de la demanda mundial.

Los alemanes empezaron también a dominar la industria del sauce. En 1860, Hermann Kolbe y sus discípulos de la Universidad de Marburgo sintetizaron ácido salicílico y su sal sódica a partir de fenol, dióxido de carbono y sodio. En 1874, uno de tales discípulos, Friedrich von Heyden, fundó en Dresde la primera gran fábrica dedicada a la producción de salicilatos sintéticos. Si en 1870 el precio del ácido salicílico fabricado a partir de la salicina era de 100 *táleros* por



1. DEL SAUCE *(Salix alba)* se extrae la salicilina. De este compuesto amargo deriva, a su vez, el ácido acetilsalicílico (aspirina), el remedio para el dolor y la fiebre más común en todo mundo. Otras especies vegetales, como la reina de los prados y la gaulteria, contienen también salicilatos.

kilogramo, cuatro años más tarde el precio del producto sintético era de 10 *táleros* por kilogramo.

El abaratamiento del ácido salicílico generalizó su uso en clínica. En 1876, Franz Stricker y Ludwig Riess, en un artículo publicado en el *Berliner Klinische Wochenschrift*, y T. J. MacLagan, en otro del *Lancet*, informaban del éxito de los salicilatos tomados en dosis de 5 o 6 gramos al día, en el tratamiento del reumatismo agudo (enfermedad que recibe hoy el nombre de fiebre reumática aguda). Por desgracia, sólo los síntomas agudos de la enfermedad, y no sus consecuencias a largo plazo, respondían al tratamiento con salicilatos. Los pacientes con fiebre reumática desarrollan una respuesta inflamatoria contra sus propias articulaciones para acabar, a cualquier precio, con las bacterias que se encuentran en las mismas. El corazón padece las lesiones más graves y crónicas: al menos la tercera parte de las personas afectadas sufre alteraciones en las válvulas.

Al año siguiente, Germain Sée presentaba en París los salicilatos para tratar la gota y la poliartritis crónica, categoría ésta que abarca la artritis reumatoide (alteración inflamatoria incapacitante de los adultos que afecta con mayor frecuencia a las mujeres) y la osteoartritis degenerativa (enfermedad muy dolorosa que presentan los futbolistas en las rodillas, las bailarinas en los dedos de los pies y la mayoría de las personas de más de 60 años en diversas articulaciones).

La aspirina, el salicilato hoy predominante, entró en liza algo más tarde. Con su descubrimiento en 1898 tuvo que ver el padre artrítico de un químico de tinciones de anilina que trabajaba en la división Bayer de la I. G. Farben. El padre de Felix Hofmann no toleraba el salicilato sódico por culpa de una irritación estomacal aguda y crónica. (Sin la menor duda, seis u ocho gramos diarios de salicilato producen una irritación de este tipo en casi todo el mundo.) Hofmann buceó en la bibliografía química para encontrar algún derivado del salicilato sódico menos ácido y descubrió el ácido acetilsalicílico. De gusto más tolerable, esa sustancia era, según confesión del propio Hofmann, más eficaz también para tratar la enfermedad de su padre. (Por lo que he podido deducir, el padre de Hofmann padecía una osteoartritis y respondía mejor a dosis analgésicas pequeñas del ácido acetilsalicílico que a las dosis antiinflamatorias de salicilato de sodio.)

Bayer le puso el nombre de aspirina al nuevo fármaco: la "a" de *acetyl* y la "spirina" del término alemán *Spirsäure* (la raíz francesa habría generado *asalicilina*). En 1899 no había ninguna industria química en la tierra que pudiera competir con los alemanes. Ganada la guerra de la aspirina, podían imponer las condiciones de la victoria.

No tardaron en introducirse en el mercado otros fármacos capaces de reducir la fiebre y el dolor. Algunos se habían inventado antes que la aspirina, pero consiguieron su aceptación sólo después del éxito de aquélla a finales de siglo. Basándose en relatos informales de Alsacia, en los que se afirmaba que tratando un derivado de la anilina con vinagre se obtenía un antipirético eficaz, Karl Morner sintetizó en 1889 la acetanilida, en esencia una versión anilínica del ácido acetilsalicílico.

La acetanilida deprimía la actividad de la médula ósea y provocaba anemia. Se buscaron por tanto otros derivados. El producto derivado de la anilina que conoció mayor fortuna fue la fenacetina: la misma "P" (phenacetina) se encuentra en el compuesto APC, muy apreciada desde 1939 por los médicos militares norteamericanos que administraban a los reclutas con fiebre una pastilla compuesta de aspirina, fenacetina y cafeína. La acetanilida y la fenacetina se metabolizan en el organismo y se transforman en *N*-acetil-*p*-aminofenol, que, por diferentes combinaciones anagramáticas, lleva los nombres genéricos de "acetaminofeno" en los

FARMACOS ANTIINFLAMATORIOS NO ESTEROIDEOS

ACIDOS CARBOXILICOS				PIRAZOLES	OXICANOS
SALICILATOS	***ACIDOS ACETICOS***	***ACIDOS PROPIONICOS***	***FENAMATOS***		
ACIDO ACETILSALICILICO (ASPIRINA)	INDOMETACINA	IBUPROFENO	ACIDO MEFENAMICO	FENILBUTAZONA	PIROXICAM
SALSALATO	ACEMETACINA	FLURBIPROFENO	ACIDO FLUFENAMICO	FEPRAZONA	ISOXICAM
DIFLUNISAL	CINMETACINA	NAPROXENO	MECLOFENAMATO	APAZONA	TENOXICAM
FENDOSAL	SULINDAC	KETOPROFENO	ACIDO NIFLUMICO	TRIMETAZONA	
	TOLMETIN	FENOPROFENO	ACIDO TOLFENEMICO	MOFEBUTAZONA	
	ZOMEPIRAC	BENOXAPROFENO	FLUNIXIN	KEBUZONA	
	DICLOFENAC	INDOPROFENO	CLONIXIN	SUXIBUZONA	
	FENCLOFENAC	PIRPROFENO			
	ISOXEPAC	CARPROFENO			

Estados Unidos y de "paracetamol" en Gran Bretaña, además del comercial "Tylenol".

Pero ni la acetanilida ni la fenacetina demostraron la eficacia de la aspirina en el tratamiento de la fiebre reumática o la artritis reumatoide. Durante medio siglo, de 1900 a 1950, los médicos pensaron que unas dosis altas de salicilatos no tenían sustituto. Por encima de los cuatro gramos de aspirina al día no sólo aliviaban la fiebre y el dolor: relajaban también la inflamación y aliviaban los síntomas objetivos. Se sometieron a control ciertos marcadores de laboratorio de la enfermedad, verbigracia, tasas de sedimentación eritrocitaria (la velocidad con la que los eritrocitos caen a través del plasma) y los niveles de la proteína c-reactiva, una sustancia producida por el hígado en respuesta al proceso infeccioso. Aunque más tarde se vio que el ibuprofeno, la indometacina y el piroxicam, entre otros fármacos, actuaban también contra la inflamación, no estaban claros sus mecanismos de acción.

No había, a principios de los setenta, ninguna hipótesis sólida que explicara los mecanismos mediante los cuales los salicilatos ejercían sus múltiples efectos. Los fisiólogos renales descubrieron que dosis bajas de salicilatos bloqueaban la excreción de ácido úrico en los riñones, elevando por tanto su concentración en la sangre, y que, paradójicamente, las dosis altas de salicilatos inducían la excreción renal del ácido, disminuyendo sus niveles en sangre. Esta última propiedad explicaba la eficacia de los salicilatos en el tratamiento de la gota aguda y crónica.

Los farmacólogos habían demostrado que los salicilatos mitigan el dolor al actuar sobre los tejidos y nervios sensoriales asociados, a diferencia de la morfina, que ejerce su acción sobre el cerebro. Pero los fisiólogos mantenían que los salicilatos reducían la fiebre interviniendo directamente en los centros de la fiebre del hipotálamo, y no mediante acción periférica.

Más difícil resultaba explicar por qué la aspirina inhibía la función de las plaquetas, producía retención de sal y líquidos y causaba indigestión. Y por qué algunos pacientes desarrollaban pólipos nasales acompañados de estornudos y mucosidades, alteración que se conoce por hipersensibilidad a la aspirina.

En 1971, John R. Vane (que goza hoy del título de "Sir" y recibió el premio Nobel en 1982) propuso, con sus colaboradores del Real Colegio de Médicos de Londres, la primera explicación convincente del mecanismo de acción de la aspirina. Su hipótesis trajo, a las sustancias relacionadas con la aspirina, al primer plano de la farmacología, la biología celular y, con el tiempo, la medicina clínica.

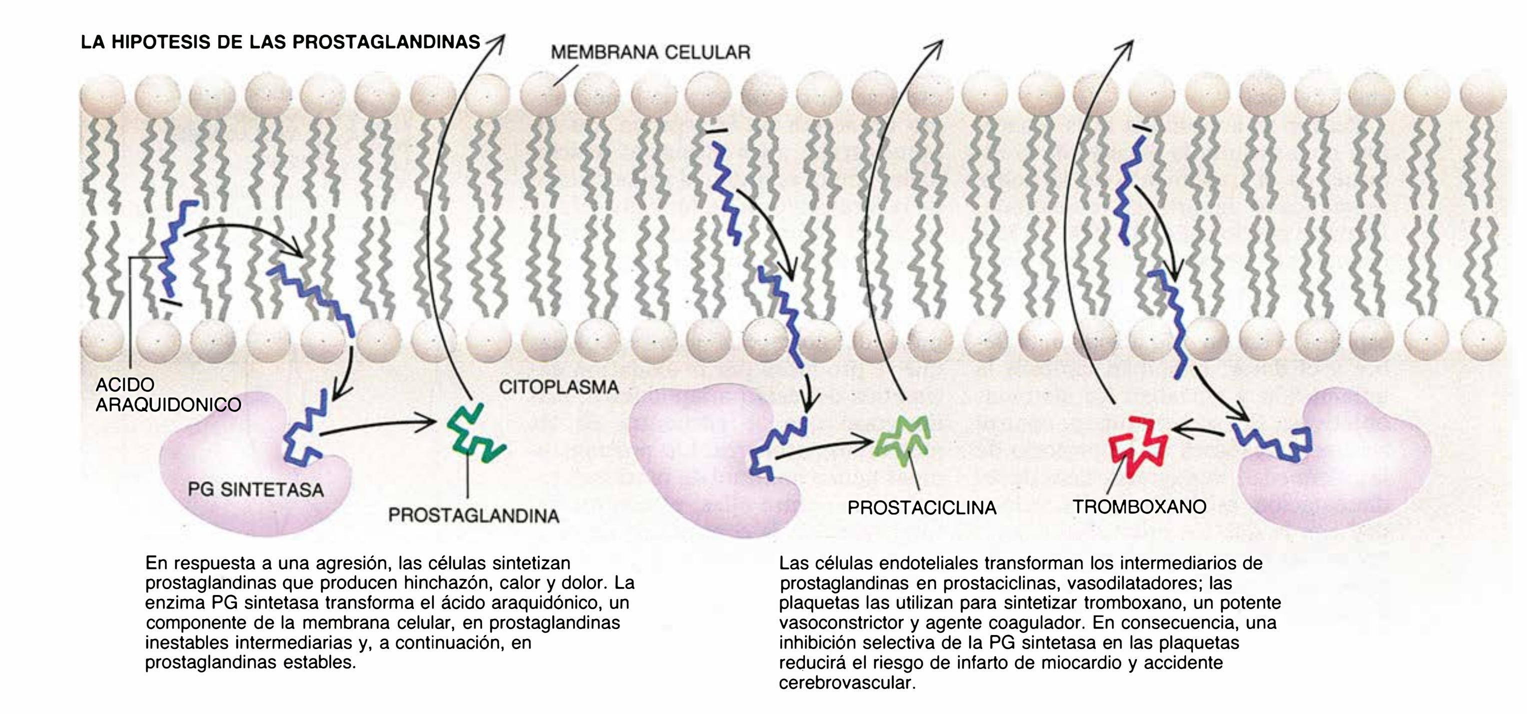
Vane había observado que, a muchas formas de lesión hística, seguía una liberación de prostaglandinas, familia de hormonas locales ubicuas que se producen por la oxidación enzimática del ácido araquidónico, ácido graso que se encuentra en las membranas celulares. Las prostaglandinas tienen multitud de funciones reguladoras; entre ellas, el control del tono vascular, la contracción del útero y las funciones de las plaquetas. A diferencia de la insulina y otras hormonas, las prostaglandinas no se almacenan en el interior celular, sino que se liberan si se lesionan las células o están sometidas al estímulo de otras hormonas. Además, en ensayos químicos y biológicos, muy puntillosos, se había conseguido demostrar que dos grupos de prostaglandinas, la E_2 y la I_2, producían síntomas inflamatorios: enrojecimiento (vasodilatación) y calor (fiebre).

Vane utilizó entonces ácido araquidónico marcado radiactivamente para demostrar que la aspirina y sustancias análogas inhibían la síntesis de prostaglandinas E_2 y $F_2\alpha$. Por otra parte, las plaquetas obtenidas de voluntarios a los que se había administrado aspirina e indometacina eran incapaces de sintetizar prostaglandinas en respuesta al factor coagulante trombina. Por último, la indometacina impedía la liberación normal de prostaglandinas en los bazos de perros estimulados con el neurotransmisor catecolamina. No había duda alguna del bloqueo de la síntesis de prostaglandinas por parte de los análogos de la aspirina.

Vista en retrospectiva, la curva histórica de los salicilatos había cerrado su ciclo de origen, crecimiento y punto final. Sólo faltaba perfilar los detalles: demostrar cómo y cuándo las prostaglandinas producían el enrojecimiento y la hinchazón acompañados de calor y dolor, amén de estudiar los mecanismos en virtud de los cuales las sustancias similares a la aspirina inhibían la enzima que transformaba el ácido araquidónico en prostaglandinas. La prostaglandín sintetasa H, nombre actual de esa enzima, produce prostaglandinas estables (de las series E, I y F) a través de los intermedios inestables PGG_2 (prostaglandinas G_2) y PGH_2 (descubiertos en los años setenta por otro premio Nobel, Bengt Samuelsson, del Instituto Karolinska en Estocolmo).

Hacia 1974, Vane y Sergio Ferreira habían acumulado pruebas suficientes a favor de la hipótesis de las prostaglandinas. Casi todas las sustancias análogas a la aspirina (que entonces respondían al nombre genérico de fármacos antiinflamatorios no esteroideos, o AINE) inhibían la prostaglandín sintetasa; la potencia de estos compuestos corría paralela a su eficacia. La actividad de la aspirina se cifraba entre 1/40 y 1/200 la mostrada por la indometacina y entre 1/5 y 1/50 veces la ofrecida por el ibuprofeno. Más aún. Los analgésicos de acción central, verbigracia, la morfina y la codeína, no inhibían la prostaglandín sintetasa; ni tampoco lo hacían los antihistamínicos, los fármacos antiserotoninérgicos o la cortisona y sus análogos.

Vane y sus colaboradores razonaron que las prostaglandinas no sólo se producían en las zonas de inflamación, sino que podían, solas o en conjunción con otros mediadores, provocar los síntomas cardinales de la inflamación. La verdad es que las prostaglandinas E_2 e I_2 inducen una vasodilatación e hinchazón, cuando



En respuesta a una agresión, las células sintetizan prostaglandinas que producen hinchazón, calor y dolor. La enzima PG sintetasa transforma el ácido araquidónico, un componente de la membrana celular, en prostaglandinas inestables intermediarias y, a continuación, en prostaglandinas estables.

Las células endoteliales transforman los intermediarios de prostaglandinas en prostaciclinas, vasodilatadores; las plaquetas las utilizan para sintetizar tromboxano, un potente vasoconstrictor y agente coagulador. En consecuencia, una inhibición selectiva de la PG sintetasa en las plaquetas reducirá el riesgo de infarto de miocardio y accidente cerebrovascular.

se permeabilizan mediante histamina vasos sanguíneos dilatados. También producen fiebre, si se inyectan en el interior de los ventrículos cerebrales o en el hipotálamo anterior; por último, sensibilizan los receptores del dolor de la piel ante otras sustancias causantes de dolor como la bradiquinina o la histamina.

La hipótesis de las prostaglandinas hallaba su apoyo más sólido en la explicación de los efectos colaterales clínicos de los AINE. El más preocupante de ellos era la irritación y ulceración del estómago; la aspirina llevábase, en ese sentido, la palma. Estos fármacos producen la irritación porque bloquean la síntesis de prostaglandinas que el revestimiento del estómago necesita para regular la síntesis excesiva de ácido y para fabricar la barrera mucosa que evita su autodigestión.

Por otra parte, la mayoría de los AINE impiden la excreción normal de sal y agua del organismo, en particular cuando una enfermedad cardíaca o hepática compromete el flujo de sangre hacia los riñones. Cuando los AINE inhiben la síntesis de PGI_2 (prostaglandina que dilata los vasos sanguíneos) en los riñones, el aporte de sangre renal cae todavía más. En ocasiones, el enfermo acumula suficiente cantidad de líquidos para colapsar su circulación.

Otro efecto colateral de los AINE —no así del salicilato sódico— es el síndrome de hipersensibilidad a la aspirina en pacientes genéticamente susceptibles. Por el bloqueo de la prostaglandín sintetasa, el ácido araquidónico toma otra vía metabólica que lo habrá de transformar en una serie de sustancias —especialmente los leucotrienos B_4, C_4 y D_4—, que superan en potencia irritativa a los productos de la PGH sintetasa.

Finalmente, el efecto colateral más común de los AINE, y en especial de la aspirina, es su interposición a la coagulación sanguínea. Se dan casos de enfermos que toman estos fármacos y sufren hemorragias graves después de una extracción dental, una intervención quirúrgica menor o un traumatismo. La aspirina inhibe la agregación plaquetaria (la fase celular de la coagulación) y otros AINE —nuevamente con la excepción del salicilato sódico— impiden también la función plaquetaria.

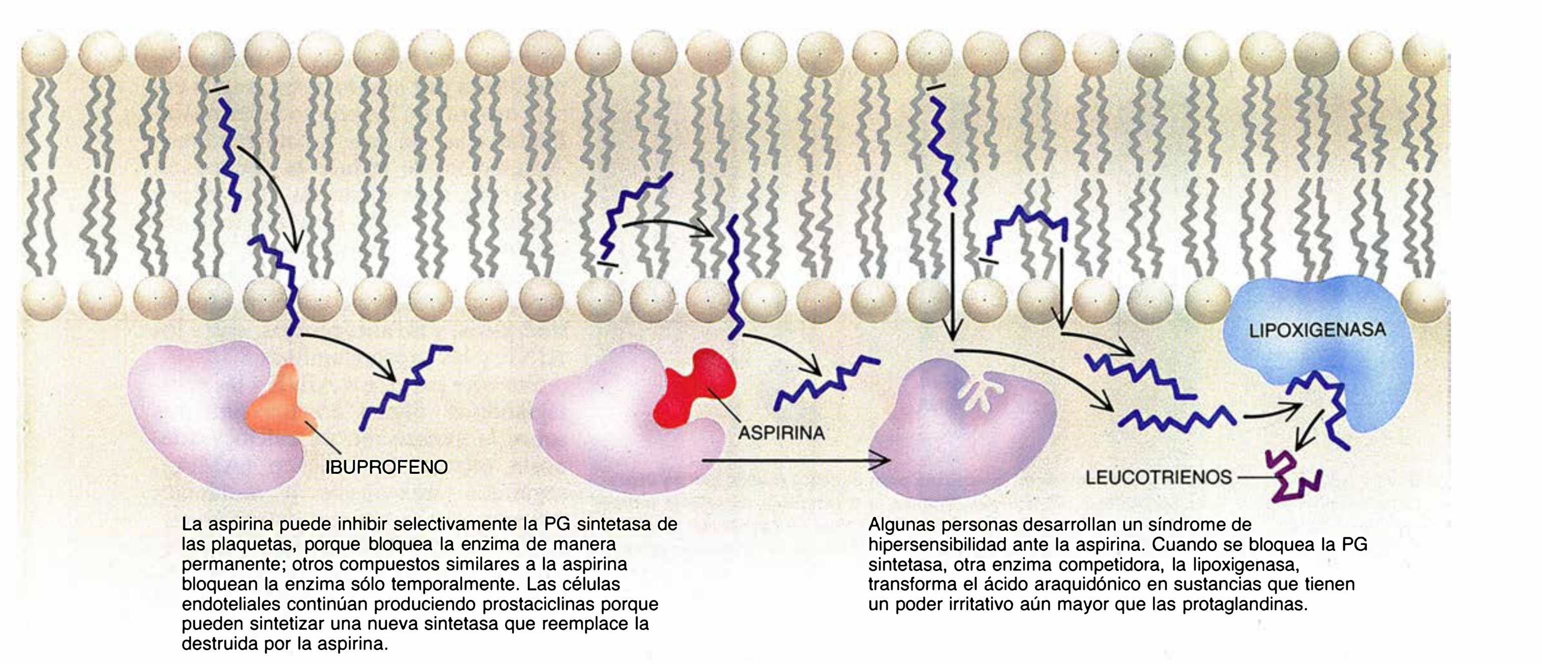
Los AINE actúan bloqueando la producción de PGG_2 y PGH_2. Las plaquetas transforman a esta última en tromboxano B_2, vasoconstrictor más potente que interviene en la agregación plaquetaria. En el ínterin, las células endoteliales que tapizan los vasos sanguíneos aprovechan esos mismos intermediarios prostaglandínicos para sintetizar un potente vasodilatador, la prostaciclina o PGI_2.

Estos hallazgos proporcionan la base para el uso de la aspirina en la prevención de accidentes cerebrovasculares e infartos de miocardio: dosis cuidadosamente calibradas pueden entorpecer la producción de tromboxano sin afectar a la síntesis de prostaciclinas. La aspirina inactiva irreversiblemente la PGH sintetasa. Las plaquetas no pueden fabricar más sintetasa ni, por ende, más tromboxano. Las células endoteliales, sin embargo, sí pueden producir más sintetasa, con lo que la síntesis de prostaciclinas se inhibe sólo unos días.

Garret A. FitzGerald y John Oates, de la facultad de medicina de la Universidad de Vanderbilt, han demostrado, por su parte, que con menos de una tableta diaria se bloquea irreversiblemente la actividad de la PGH sintetasa de las plaquetas en la circulación portal (la circulación que fluye desde los intestinos hacia el hígado), reduciendo por tanto el riesgo de formación de trombos, antes de que aparezcan en la circulación cantidades apreciables de aspirina, donde pueden alterar la producción de prostaciclinas.

Ningún descubrimiento subsecuente a la hipótesis de Vane ha tenido mayor incidencia en la salud pública: los cientos de miles de enfermos en todo el mundo que consumen aspirinas para prevenir o tratar los accidentes cerebrovasculares y los infartos de miocardio tienen contraída una deuda con Sir John.

Es cierto que la hipótesis de las prostaglandinas permitía explicar los efectos de dosis muy bajas (antitrombóticas) y medianas (analgésicas y antipiréticas) de aspirina. Aunque aparecían discrepancias preocupantes, Vane y sus colaboradores dieron sólida respuesta. Por ejemplo, el acetaminofeno no impide la síntesis de las prostaglandinas, pero



La aspirina puede inhibir selectivamente la PG sintetasa de las plaquetas, porque bloquea la enzima de manera permanente; otros compuestos similares a la aspirina bloquean la enzima sólo temporalmente. Las células endoteliales continúan produciendo prostaciclinas porque pueden sintetizar una nueva sintetasa que reemplace la destruida por la aspirina.

Algunas personas desarrollan un síndrome de hipersensibilidad ante la aspirina. Cuando se bloquea la PG sintetasa, otra enzima competidora, la lipoxigenasa, transforma el ácido araquidónico en sustancias que tienen un poder irritativo aún mayor que las protaglandinas.

actúa contra la sintetasa cerebral (lo que quizás explique su efecto antipirético). Y a pesar de que los salicilatos no acetilados tienen casi una décima parte de la potencia de la aspirina contra la prostaglandín sintetasa *in vitro* —señal de ineficacia analgésica—, ciertos estudios realizados con metabolitos de las prostaglandinas demuestran que el salicilato sódico podría inhibir la síntesis de prostaglandinas en el organismo.

Sin embargo, la teoría de Vane de que la producción local de prostaglandinas causa el proceso inflamatorio se ha comprobado sólo en parte. El efecto antiinflamatorio de los salicilatos requiere dosis mucho mayores que el analgésico. Discrepancia que nos mueve a pensar que, o bien la prostaglandín sintetasa celular, responsable de la inflamación, es relativamente insensible a la aspirina, o bien la aspirina debe sus funciones antiinflamatorias a un mecanismo de acción distinto de su propia capacidad para inhibir la síntesis de prostaglandinas.

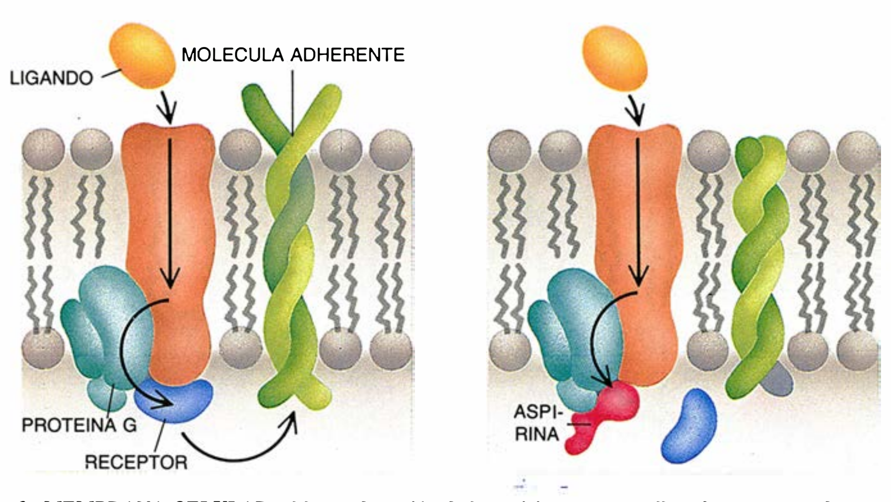
Las propiedades del salicilato sódico y del acetaminofeno corroboran la posibilidad de que las sustancias similares a la aspirina tengan efectos clínicos que no dependen de la inhibición de la síntesis de prostaglandinas. El salicilato sódico comparte muchas de las propiedades antiinflamatorias de la aspirina; ahora bien, a las concentraciones que habitualmente se alcanzan en el organismo, no es capaz de inhibir la síntesis de prostaglandinas en cultivos celulares trastornados. Tampoco inhibe las funciones plaquetarias, ni causa hemorragias. Y el fármaco analgésico y antipirético de mayor uso, el acetaminofeno, no bloquea la síntesis de las prostaglandinas, ni impide el proceso de la coagulación, ni tampoco reduce la inflamación. Dolor y fiebre remiten, así parece, sin tener que inhibir la síntesis de prostaglandinas.

El amplio espectro de efectos que presentan los AINE resultan verosímilmente de sus propiedades físicas, que les permiten alterar las interacciones con la membrana biológica. Los AINE son moléculas planares y aniónicas, con afinidad por los medios lipídicos (piénsese en la doble capa de lípidos de las membranas plasmáticas). Además, cuanto mayor es la acidez del medio (lo que sucede en las zonas de inflamación), mayor es la lipofilia de los AINE. No debe sorprendernos, pues, que estas sustancias laboren contra muchas de las funciones de las células inflamatorias.

La aspirina altera la captación de ácidos grasos y su inclusión en las membranas de monocitos y macrófagos humanos en cultivo. Los salicilatos inhiben también el transporte de aniones a través de distintas membranas celulares. Por último, los AINE inhiben el metabolismo de los huesos y la síntesis de proteoglicano, sustancia que constituye la matriz del cartílago, por medio de mecanismos que no dependen de la inhibición de la prostaglandín sintetasa. Esta última observación, amén de debilitar la hipótesis de las prostaglandinas, reviste especial interés clínico.

Los últimos trabajos llevados a cabo en mi laboratorio han sacado a la luz un mecanismo alternativo que explicaría los efectos de las sustancias análogas a la aspirina: su oposición al proceso de estímulo-respuesta relacionado con los neutrófilos. Estas células, las más abundantes en la inflamación aguda, constituyen la primera línea de defensa contra los intrusos y se encuentran entre las pioneras también en la producción de lesiones en enfermedades autoinmunes, como la artritis reumatoide. Lesionan los tejidos al liberar enzimas capaces de degradar las proteínas (proteasas) y péptidos inflamatorios, sustancias reactivas de oxígeno tales como el O_2^- y el H_2O_2 (peróxido) e irritantes lipídicos, como el factor activador de las plaquetas y el leucotrieno B_4.

A los cinco segundos de haber tomado contacto con las sustancias que generan la inflamación (complejos inmunes, componentes del complemento —una cascada de enzimas y péptidos bioactivos que interaccionan con los anticuerpos para provocar una respuesta inmune— y otros quimiotácticos), los neutrófilos se transforman en células secretoras, prestas a lesionar los tejidos. Uno de los primeros estadios en la aparición de lesión hística es la agregación de los neutrófilos o adhesiones célula a célula. La adhesión "homotópica" entre neutrófilos y la adhesión "hete-



2. MEMBRANA CELULAR, el lugar de acción de la aspirina para aquellos efectos que no dependen de la inhibición de las prostaglandinas. El fármaco bloquea la transmisión de señales químicas a través de la membrana uniéndose a una proteína reguladora clave. Se impide así el primer paso del proceso inflamatorio: la adhesión de los leucocitos a las paredes de los vasos sanguíneos.

rotópica" entre neutrófilos y paredes de los vasos sanguíneos son necesarias para que las células abandonen el sistema circulatorio y produzcan la inflamación.

Se ha observado que dosis terapéuticas de salicilatos y AINE son capaces, sin embargo, de inhibir la adhesión célula a célula de los neutrófilos humanos. Y similares dosis de salicilato sódico y de aspirina tienen los mismos efectos sobre los neutrófilos, a pesar de que produzcan otros muy divergentes en la prostaglandín sintetasa. Por tanto, es más probable que su efecto antiinflamatorio se relacione con la capacidad de ambos compuestos para impedir la adhesión homotópica y heterotópica de los neutrófilos y no con su desigual efecto sobre la síntesis de prostaglandinas.

Se puede también demostrar los efectos inhibidores de los AINE sobre la activación de los neutrófilos en clínica. El funcionamiento de los neutrófilos de individuos a los que se han administrado dosis terapéuticas de indometacina, piroxicam o ibuprofeno, queda significativamente reducido. Los neutrófilos del líquido sinovial de las articulaciones de los pacientes con artritis reumatoide producen una menor cantidad del anión superóxido —derivado de la molécula de oxígeno capaz de lesionar las células— después de diez días de tratamiento con piroxicam. Y células obtenidas de voluntarios normales a los que se había administrado ibuprofeno o piroxicam durante tres días no conseguían agregarse normalmente en respuesta a los factores quimiotácticos.

Todos los AINE inhiben la adhesión homotípica de los neutrófilos; difieren, sin embargo, en sus efectos sobre otras funciones de las mismas células. El piroxicam bloquea la generación del anión superóxido en neutrófilos expuestos a diversos quimiotácticos; no así el ibuprofeno. De forma similar, el piroxicam y la indometacina inhiben la generación del anión superóxido en preparaciones de células destruidas, lo que no realizan el salicilato sódico, el ibuprofeno ni el AINE meclofenamato.

El hecho de que, como se ha comprobado en muchos laboratorios, el nuestro incluido, las prostaglandinas estables E_1, E_2 e I_2 posean tanto propiedades antiinflamatorias como proinflamatorias debilita aún más la hipótesis de Vane. Robert B. Zurier, de la facultad de medicina de la Universidad de Pennsylvania, y otros investigadores han demostrado que dosis altas de prostaglandinas estables inhiben la inflamación en animales con artritis y que dosis mucho menores inhiben inflamaciones similares inducidas por irritantes cutáneos locales. También se conoce desde los inicios de la década de los setenta que la PGI_2 y las prostaglandinas del tipo E inhiben la activación *in vitro*, no sólo de las plaquetas, sino también de las células que intervienen en la inflamación (neutrófilos y fagocitos mononucleares).

Por paradójico que resulte, lo mismo los AINE que las prostaglandinas de la serie E inhiben los efectos de la activación de los neutrófilos o plaquetas. Añadiendo piroxicam a una preparación de neutrófilos humanos expuestos a un quimiotáctico, quimioatractor, podemos rebajar la generación de anión superóxido en aproximadamente el 40 por ciento. Sin embargo, añadiendo PGE_1 o PGE_2 a concentraciones de nanomolar a micromolar no se anula la inhibición producida por el piroxicam, según cabría esperar de las propiedades proinflamatorias de las prostaglandinas. Antes bien, se reduce la generación del anión superóxido en otro 40 por ciento. En ciertos estudios más recientes sobre el misoprostol, que es un derivado de la PGE_1, muy útil en clínica, se observan también efectos sinérgicos, y no antagónicos, entre los AINE y las prostaglandinas.

Por otra parte, los AINE y las prostaglandinas tienen efectos similares sobre la generación de calcio y adenosín monofosfato cíclico (AMPc), segundos mensajeros o sustancias transmisoras de señales entre células. Al igual que la indometacina, un pretratamiento de la célula con PGE_2 disminuye los aumentos del calcio intracelular inducidos por factores quimiotácticos en neutrófilos humanos. Para provocar sus efectos, los quimiotácticos elevan algo los niveles de AMPc en el neutrófilo; pero ocurre que las prostaglandinas aumentan los niveles intracelulares de AMPc en cuantía mayor, y así se antagoniza la activación de la célula. Los AINE, por su lado, refuerzan el aumento de AMPc provocado por los quimiotácticos.

Parte del efecto ejercido por los AINE sobre las células tiene que ver con su oposición al enlace de los factores quimiotácticos y otros estímulos. Los AINE inhiben el enlace de algunos de tales ligandos con sus receptores en la membrana celular, mientras que el acetaminofeno, incapaz de bloquear la agregación celular, no actúa sobre dicho enlace.

Pero no bastan los efectos de los AINE sobre el enlace de los quimiotácticos para explicar los que ejerce sobre los neutrófilos. Los AINE inhiben la activación de la célula en respuesta a ligandos a cuyo enlace no se interponen, como es el caso del $C5_a$ (un quimiotáctico peptídico), el factor de activación plaquetaria y el leucotrieno B_4. Los AINE inhiben también la activación en respuesta a otros estímulos. H. Daniel Pérez, de la Universidad de California en San Francisco, ha demostrado que el meclofenamato, por ejemplo, bloquea las funciones de los neutrófilos inducidas por el $C5_a$ sin afectar al enlace de esa misma sustancia marcada radiactivamente.

Puesto que los AINE son moléculas ácidas lipófilas cabría esperar que alteraran los procesos de la membrana celular que dependieran de la mo-

vilidad general de los lípidos de la membrana. Concentraciones de salicilatos de sólo 100 micromoles por litro relajan la viscosidad de las membranas de los neutrófilos, mientras que el piroxicam y la indometacina la aumentan a concentraciones de 10 a 50 micromoles por litro. El analgésico acetaminofeno no afecta a la viscosidad de la membrana ni al paso de transmisores químicos a través de la misma.

En estudios realizados con preparaciones de membranas purificadas y neutrófilos sin manipular se demuestra que los AINE se interfieren en las señales que dependen de las proteínas G para la transducción a través de las membranas celulares. Las pruebas que apoyan esta hipótesis se basan en los experimentos en que se exponen las células a la toxina "pertussis". Esta toxina bacteriana se interpone en la transducción de señales en distintas células, neutrófilos incluidos, mediante la alteración de ciertas proteínas G de la membrana plasmática. Neutrófilos tratados con la toxina producen menor cantidad de anión superóxido cuando se les expone luego a factores quimiotácticos.

De manera similar, aunque sin esa eficacia, el salicilato sódico inhibe la producción de superóxido. Ahora bien, las células incubadas con toxina pertussis y salicilato sódico recuperan la capacidad, bloqueada por la toxina, de generar anión superóxido. Este paradójico efecto sugiere que los salicilatos se oponen a la acción de la toxina pertussis en la vecindad de la interacción con la proteína G; deben también interaccionar con la proteína G en la membrana celular.

Añádase a ello que el salicilato, el piroxicam y la indometacina impiden la alteración de la proteína G inducida por la toxina en membranas de neutrófilos purificadas; salicilatos y piroxicam bloquean en parte otros efectos que, debidos a la acción de la toxina pertussis, siguen a la activación celular.

Ninguno de estos efectos de los AINE guarda relación con la síntesis de prostaglandinas. Pero el golpe de gracia contra la hipótesis de las prostaglandinas se lo da una esponja marina, *Microconia prolifera*, confinada entre las criaturas más primitivas y antiguas. Se remontan sus orígenes mil millones de años atrás. Ofrece un modelo único para estudiar los efectos antiinflamatorios de los AINE.

Las prostaglandinas estables no intervienen en la activación de las células de la esponja en el curso de su agregación; tampoco las células contienen enzimas que puedan sintetizar prostaglandinas. Sin embargo, los AINE (aunque no el acetaminofeno) inhiben la agregación de estas células, lo mismo que inhibían los neutrófilos. Las células dispersas se agregan en respuesta a una molécula específica para la especie MAF, con un peso de alrededor de 20 millones de daltons. Los AINE bloquean la agregación celular en respuesta al MAF a concentraciones similares a las que inhiben la agregación de los neutrófilos. Puesto que las esponjas marinas no pueden sintetizar prostaglandinas, está claro que los efectos de los AINE —igual que los ejercidos en células de insectos, plantas o seres humanos (los neutrófilos)— no pueden deberse a la inhibición de la síntesis de prostaglandinas.

La hipótesis de las prostaglandinas de Vane permite explicar una buena parte de la acción de la aspirina y sustancias afines, pero queda aún mucho por descubrir acerca de la biología de estos compuestos y de su interacción con los sistemas fundamentales de las células. Sin embargo, es alentador saber que ya han ayudado a descubrir rutas bioquímicas que los humanos comparten con criaturas cuya lejanía evolutiva se remonta mil millones de años atrás.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

INHIBITION OF PROSTAGLANDIN SYNTHESIS AS A MECHANISM OF ACTION FOR ASPIRIN-LIKE DRUGS. J. R. Vane en *Nature-New Biology*, vol. 231, n.º 25, págs. 232-235; 23 de junio de 1971.

NEW ASPECTS OF THE MODE OF ACTION OF NONSTEROIDAL ANTI-INGLAMMATORY DRUGS. S. H. Ferreira y J. R. Vane en *Annual Review of Pharmacology*, vol. 14, págs. 57-73; 1974.

DOSE-RELATED KINETICS OF ASPIRIN: PRESYSTEMIC ACETYLATION OF PLATELET CYCLOOXYGENASE. Anders K. Pederson y Garret A. FitzGerald en *New England Journal of Medicine*, vol. 311, n.º 19, págs. 1206-1211; 8 de noviembre de 1984.

MODES OF ACTION OF ASPIRIN-LIKE DRUGS. Steven Abramson, Helen Korchak, Rocio Ludewig, Henry Edelson, Kathleen Haines, Richard I. Levin, Robert Herman, Lisa Rider, Steven Kimmel y Gerald Weissmann en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 82, n.º 21, págs. 7227-7231; noviembre de 1985.

THE MECHANISMS OF ACTION OF NONSTEROIDAL ANTIINFLAMMATORY DRUGS. Steven B. Abramson y Gerald Weissmann en *Arthritis & Rheumatism*, vol. 32, n.º 1, págs. 1-9, enero de 1989.

Coevolución del cuco y sus patrones

El cuco se reproduce a expensas de otros al poner sus huevos en los nidos de éstos. Dicha estrategia provoca una carrera de armamentos evolutiva entre el parásito y su forzado patrón

Nicholas B. Davies y Michael Brooke

Uno de los espectáculos más notables que le es dado ver a un naturalista en verano es el de un pequeño carricero dando de comer a un joven cuco o cuclillo *(Cuculus canorus)*. Cuando el pollo de cuco se ha desarrollado, desborda el minúsculo nido, y los carriceros parecen correr el riesgo de ser devorados mientras se inclinan profundamente en la enorme boca abierta para suministrar la comida. Una vez el cuco abandona el nido, la situación adquiere tintes espectaculares. Los carriceros se posan sobre el dorso del cuco para alcanzar la boca de un volantón que tiene ocho veces el peso de aquéllos.

Desde Aristóteles, por lo menos, que escribió hace 2300 años, se conocen los hábitos parasitarios del cuco. Pero sólo recientemente los biólogos se han comprometido en el estudio pormenorizado de las artes de que se vale el cuco para engañar a los patrones, que cuidarán así a su pollo. El subterfugio les cuesta caro a los patrones en términos evolutivos; aunque el cuco sólo pone un huevo en cada nido, su cría expulsa a los huevos o pollos del patrón, convirtiéndose en ocupante único del nido.

NICHOLAS B. DAVIES y MICHAEL BROOKE colaboran en el estudio de los cucos en la Universidad de Cambridge. Davies enseña zoología en el Pembroke College. Anteriormente fue profesor en el Instituto Edward Grey de la Universidad de Oxford. Ha publicado estudios sobre acentores, lavanderas y sapos. Brooke trabajó de guarda en el Observatorio de Aves de Skokholm, en aguas de la costa de Gales, donde estudió la pardela pichoneta, un ave marina nativa de la zona. Administró una reserva natural en las islas Seychelles, obtuvo una plaza de investigador en Oxford y después se trasladó a Cambridge.

Puesto que los patrones no obtienen ninguna ventaja reproductora a cambio de sus esfuerzos alimentarios, la selección natural deberá primar rasgos que les ayuden a frustrar a los cuclillos. A su vez, la evolución de tales características instará la selección de ardides más refinados por parte del parásito. Asistimos así a una "carrera de armamentos" evolutiva entre el cuco y el patrón, que resulta en adaptaciones y contraadaptaciones cada vez más intrincadas.

En el curso de nuestra exposición emplearemos frases y giros que podrían interpretarse dentro de una evolución teleológica: estrategias y contraestrategias, búsqueda de beneficios, ahorro de costes. Son expresiones escuetamente metafóricas. La selección natural carece de intención alguna; actúa favoreciendo la reproducción de individuos que poseen rasgos ventajosos y heredables.

Muchas características de los organismos son resultado de la coevolución. Por ésta se entiende el proceso de interacción recíproca con otro grupo en el que cada parte se ha adaptado a presiones selectivas impuestas por la otra parte. Hay ejemplos de coevolución mutualista, en los que cada parte obtiene un beneficio. Así, muchas bayas de plantas de setos se enrojecen al llegar el otoño para señalar a las aves que han llegado a su sazón; las aves obtienen una comida nutritiva y la planta se ve favorecida así con la dispersión de sus semillas a nuevos pastos. En otros casos, como en el del cuco frente a los patrones, o los depredadores frente a las presas, un grupo obtiene un beneficio al tiempo que el otro soporta un coste. Dos motivos nos arrastraron al estudio de la relación entre el cuclillo y sus patrones: constituye un caso curioso en el ámbito de la historia natural y ofrece una excelente oportunidad para desentrañar un ejemplo de coevolución mediante experimentos de campo.

En Gran Bretaña, los cucos parasitan a cuatro especies principales: el bisbita común *(Anthus pratensis)* en los páramos, el carricero común *(Acrocephalus scirpaceus)* en las marismas, el acentor común *(Prunella modularis)* en los bosques y tierras de cultivo, y la lavandera blanca enlutada *(Motacilla alba)* en terreno abierto. Se cree que cada hembra de cuclillo se especializa en una determinada especie y, por tanto, habría en Gran Bretaña cuatro estirpes genéticamente distintas de cucos hembra, que se denominan *gentes* (plural de *gens*, linaje o familia). Las hembras de cada *gens* ponen un huevo distintivo. Los cucos de bisbita los ponen parduscos, parecidos a los propios huevos del bisbita. Los cucos de carricero ponen huevos verdosos, que imitan a los huevos verdosos del carricero común. Los cucos de lavandera ponen huevos de color blanco grisáceo pálido, que semejan los del patrón. La excepción corresponde al cuco de acentor, cuyo huevo manchado y pálido contrasta claramente con los huevos de color azul inmaculado del acentor común. Las estadísticas compiladas por el Consorcio Británico para la Ornitología durante los últimos 50 años muestran que, en la isla, las proporciones de nidos parasitados son del 2,7 por ciento para el bisbita común, del 5,5 por ciento para el carricero común, del 0,4 por ciento

1. EL CUCLILLO SUPLANTADOR empequeñece a su patrón, un acentor común. Este no distingue al extraño de sus propias crías, a las que el parásito, tras eclosionar, expulsa del nido.

para la lavandera blanca y del 1,9 por ciento para el acentor común.

Nos planteamos dos cuestiones: ¿de qué manera engaña el cuco al patrón? y ¿de qué modo la selección natural adapta el comportamiento del patrón para responder al reto? Para contestar a la primera pregunta, observamos atentamente cucos de carricero común en Wicken Fen, una de las pocas reservas que quedan de antiguos humedales en las proximidades de Cambridge.

Los carriceros comunes comienzan a construir sus nidos a finales de mayo; los tejen entre tallos verticales de carrizos sobre el agua. Supervisamos 274 nidos durante la puesta y encontramos que 44 de ellos (el 16 por ciento) estaban parasitados por cucos. En ocho casos, los carriceros rechazaron el huevo de cuco, arrojándolo del nido (cuatro casos) o dejando abandonada toda la puesta (cuatro casos). Aunque los patrones se rebelaron algunas veces, en la mayoría de casos la impostura tuvo éxito.

La habilidad embaucadora del cuclillo es una mezcla de espionaje, robo, sorpresa y velocidad. De esa combinación se dio cuenta ya, hace setenta años, Edgar P. Chance, ornitólogo inglés, en el estudio pionero de los cucos de bisbita que realizó. Más recientemente, Ian Wyllie, de la Estación Experimental de Monk's Head, en Huntingdon, demostró que en los cucos de carricero común se desarrollaba idéntico procedimiento.

La hembra de cuco encuentra su nido acechando los que construyen los patrones. Días más tarde, durante el período de puesta del patrón, la hembra parasita el nido, para lo que escoge entre el mediodía y el atardecer. Antes de poner, permanece quieta en un reposadero cercano, a veces durante una hora o más, a la espera de que los dos pájaros patrones se ausenten del nido. Planea entonces súbitamente hacia éste. Separa un huevo del patrón, a veces más, pone el suyo directamente en el nido y luego se marcha volando mientras porta el huevo del patrón en el pico. La violación del nido no dura ni 10 segundos. Es difícil, pues, creer que el animal pueda haber puesto su huevo en un tiempo tan reducido. Pero una visita al nido revelará que el huevo del cuco se encuentra entre los del carricero, a los que se parece muchísimo por el color y el diseño y de los que diverge sólo por su tamaño, ligeramente mayor.

Para investigar hasta qué punto la selección natural ha modelado el comportamiento del cuco en relación a las defensas de los patrones, empleamos una técnica experimental sencilla pero potente. Nosotros mismos interpretamos el papel del cuclillo "parasitando" nidos de carricero común con modelos de huevos de cuco. Pretendíamos ir variando aspectos del proceder del cuco y observar los efectos resultantes sobre la conducta de los patrones. Los modelos poseían el mismo tamaño y peso que los huevos reales de cuco; hechos de resina, estaban pintados para que se parecieran a los distintos ejemplos que ponen las diferentes *gentes* de cuco *[véase la figura 7]*.

Comenzamos por copiar el proceder de un cuco auténtico: una tarde del período de puesta, sustituimos un huevo de un nido de carricero común por uno artificial de cuco. Los carri-



CUCO

HUEVO

CARRICERO COMUN

HUEVO

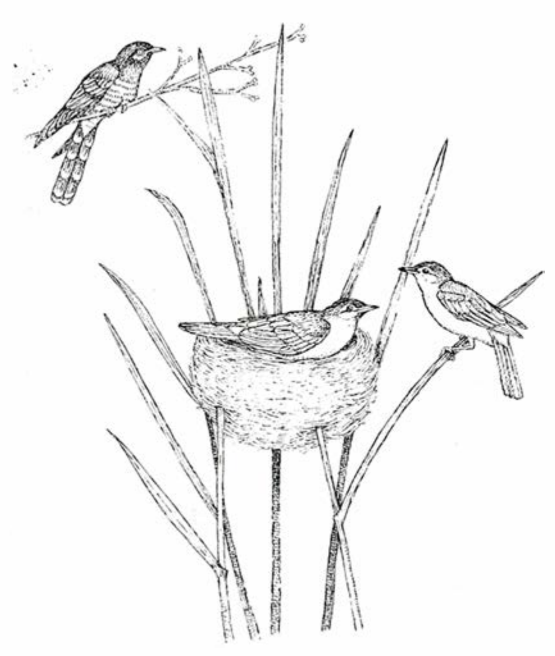
ceros aceptaron todos los huevos falsos que se parecían a los suyos en el color, pero rechazaron dos tercios de los que no se parecían; a éstos solían echarlos del nido. Primera conclusión: era obvio que la discriminación del patrón ante huevos de aspecto extraño ha instado la selección de un huevo de cuco mimético.

Sin embargo, la discriminación por parte del patrón quizá no sea la única presión de selección que favorezca la evolución de huevos de cuco miméticos: los parásitos podrían también escoger. En seis de los 44 nidos parasitados por cuclillos, un segundo cuclillo visitó luego el nido y puso un huevo. (Distinguíamos perfectamente los huevos de cuco de carricero común de otros porque cada hembra pone los huevos de un color característico e identificable.) Al segundo cuco, eso parece evidente, le saldría más a cuenta sacar el huevo del primer cuco porque, al tratarse del huevo más antiguo, tiene más probabilidades de hacer eclosión antes, tras lo cual el pollo expulsará a los demás huevos. Algunos cucos visitaron nidos donde habíamos puesto un huevo falso; efectivamente, mostraban tendencia a extraer el huevo falso si su color difería del de los huevos del patrón. Por consiguiente, la discriminación ejercida por los propios cucos pudo haber intervenido en la evolución del mimetismo de los huevos.

¿Hay otras características del comportamiento del cuco adaptadas para burlar las defensas de los patrones? Para comprobarlo, empleamos modelos de huevos miméticos y alteramos cada parte del proceder de puesta. Si colocábamos un falso huevo en el nido al alba, durante el período de puesta del patrón, los carriceros comunes solían rechazarlo. La puesta por la tarde constituye, por tanto, un elemento importante en su estrategia de engaño, por la presumible razón de que a medida que avanza el día disminuyen las probabilidades de que los carriceros estén cuidando el nido. Los huevos artificiales dejados en los nidos antes de que los patrones comenzaran su puesta fueron todos rechazados, en respuesta a la regla lógica de que "cualquier huevo que aparezca en el nido antes de que yo comience a poner no puede ser mío". En coherencia con ello, los cucos esperan la puesta de los patrones antes de parasitar un nido.

Importa, asimismo, la celeridad de la puesta. Cuando colocamos un cuco disecado en el nido de los carriceros para simular una hembra lenta en poner el huevo, los pájaros lo atacaron vigorosamente; en ellos aumentaron luego las probabilidades de rechazar de sus nidos modelos incluso muy parecidos.

E interviene, por último, el tamaño del huevo del cuco. Aun siendo un poco mayor que los huevos del patrón, sigue resultando extraordinariamente pequeño para un ave de la talla de un cuco. Cabría esperar que un ave de ese tamaño pusiera un huevo unas tres veces más pesado. Ahora bien, al dejar huevos artificiales acordes con la talla del cuco en los nidos de los carriceros fueron rechazados con frecuencia, por más que se pintaran a imagen de los huevos de carricero. Ello no obstante, la discri-



3. VIGILANCIA que dura hasta una hora o más; de ese modo se inicia la campaña del cuco de carricero común contra sus posibles patrones.





2. EL CUCO IMITA a su patrón en la fase de huevo, pero no en la de pollo. Las ilustraciones se han realizado a la mitad del tamaño real.

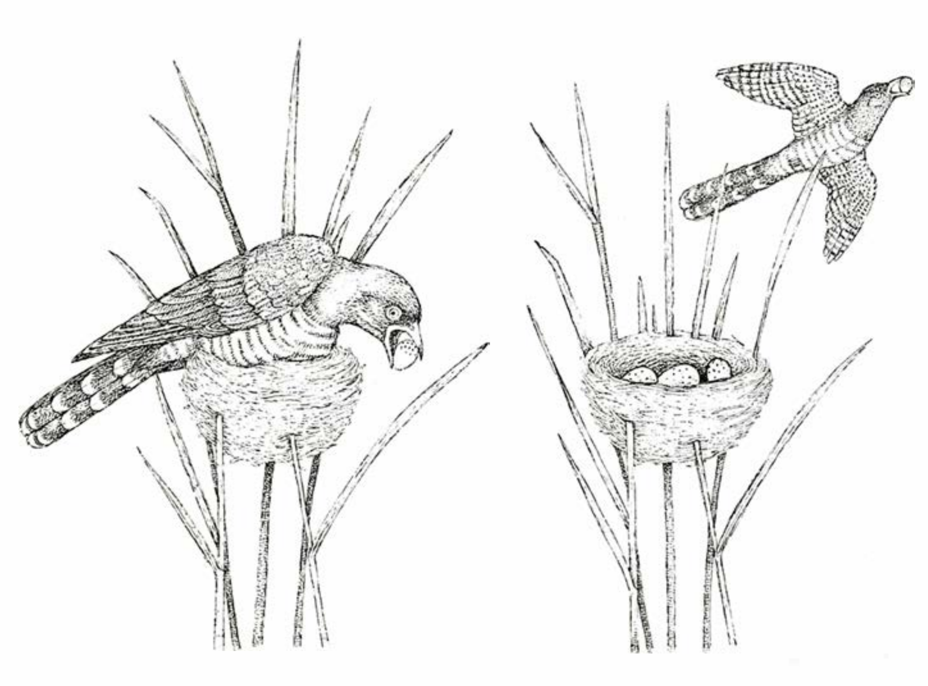
minación por parte del patrón quizá no sea la única presión de selección en pro de un huevo pequeño: los grandes podrían resultarles difíciles de incubar bien a patrones pequeños.

Todos los aspectos de la estrategia del cuco examinados hasta ahora nos ofrecen adaptaciones para aumentar las posibilidades de que el patrón acepte los huevos extraños. Hay, sin embargo, un fenómeno que no parece tener nada que ver con las defensas del patrón: la costumbre del cuco de sustraer un huevo antes de realizar su puesta. En nuestros experimentos comprobamos que los carriceros aceptaban todos los modelos miméticos; e igualmente, los no miméticos tenían la misma probabilidad de ser rechazados, con independencia de que se eliminara o no un huevo del patrón. Ello demuestra que los patrones no son alertados ante la presencia de un huevo parásito porque cuenten con un huevo suplementario en su puesta.

La hembra de cuclillo obtiene, diríase, dos ventajas de la extracción de un huevo del patrón: aumenta la eficiencia de incubación de su huevo y encuentra una comida gratuita. ¿Por qué, entonces, no saca todos los huevos y se hace así con más alimento? La conducta de los patrones torna a darnos la respuesta: cuando una puesta de carricero común se reduce de manera drástica, los pájaros la abandonan; en cambio, aunque abandonan siempre al huevo solitario, no dejan nunca sin cuidar a un único polluelo. Esta pauta de comportamiento explica con nitidez por qué es el pollo de cuco quien se encarga de expulsar al resto del contenido del nido, en vez de hacerlo su madre, mucho antes, durante el estadio de huevo. El pollo realiza el trabajo porque sólo él puede expulsar sin recibir castigo todos los huevos del patrón.

Los carriceros comunes advierten en seguida los huevos extraños y los rechazan. Manifiestan, empero, una notable tolerancia para los pollos ajenos. De hecho, no existen pruebas de que hayan rechazado nunca a pollos de cuco. Y, sin embargo, el cuerpo rosado y el gaznate de color naranja vivo del cuco recién eclosionado difieren llamativamente de la piel negra y del gaznate amarillo con manchas linguales del polluelo de carricero. Cabía imaginar que los progenitores patrones toleran a los pollos de cuco porque no tienen nada con qué compararlos; el pollo de cuco se ocupa de ello al hacer eclosión antes (necesita menos incubación) y librarse de sus rivales.

Sometimos a prueba esa hipótesis. Con ese fin, concedimos a los carriceros la oportunidad de comparar un pollo de cuco con sus propias crías. Sujetamos dos nidos uno junto a otro; en uno había un pollo de cuco y en el otro una cría de carricero común. Ante semejante situación, los patrones optaron por alimentar indiscriminadamente a los ocupantes de ambos nidos. Este experimento demostró que los carriceros no priman a sus crías sobre las de cuco aunque se les

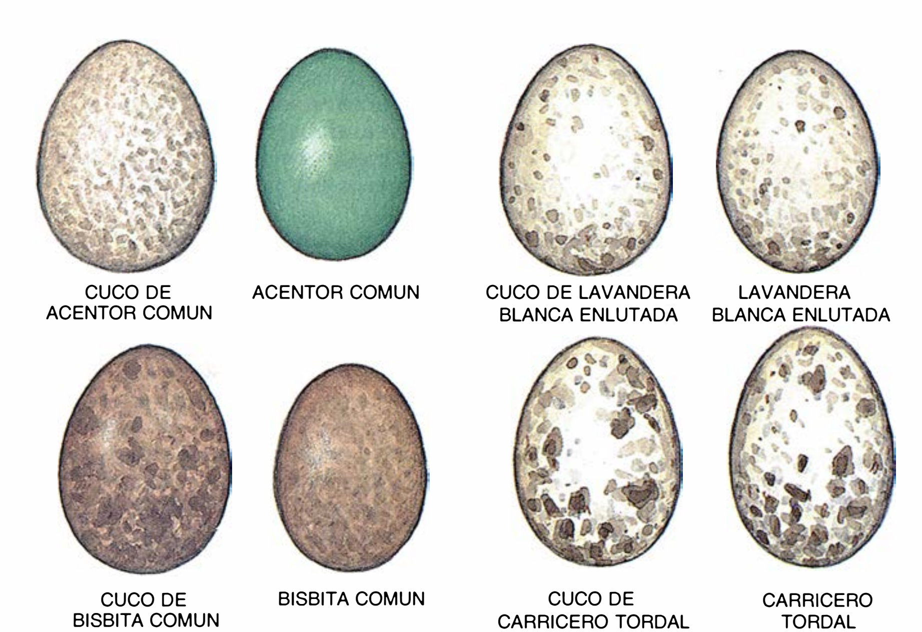




4. INVASION, que tiene lugar cuando los patrones se han ausentado del nido. El cuclillo roba entonces un huevo y pone uno de los suyos.

5. HUIDA, que lo lleva de la escena del robo a la zona de seguridad. Tiempo transcurrido desde la invasión: no llega siquiera a 10 segundos.

6. PITANZA: al comer el huevo robado, el parásito disfruta de la primera de las comidas que los patrones se ven condenados a suministrarle.



7. MIMETISMO VARIABLE de estos huevos de cucos y sus patrones, dibujados aproximadamente a su tamaño natural. Todos, excepto los del carricero tordal y el cuco que lo parasita, están tomados de poblaciones de Gran Bretaña. Los huevos de cuco son algo mayores que los huevos a los que imitan, a pesar de que el parásito pesa, por lo general, más del doble que sus patrones.

dé la oportunidad de hacerlo. Y, de paso, refutó la hipótesis de que los pollos de cuco proporcionan un estímulo supernormal que los hace más atractivos que las propias crías de sus patrones. Otros experimentos posteriores demostraron, además, que los carriceros aceptaban pollos de especie y morfología distinta (como los del escribano palustre, *Emberiza schoeniclus*) entre los de su propia pollada. Tomados en conjunto, tales resultados evidencian que los carriceros no discriminan entre lo propio y lo ajeno en estadio de pollo y que, por tanto, el cuco no se ha visto forzado, por la selección natural, a desarrollar un pollo mimético.

¿A qué se debe que los patrones no prefieran unas crías a otras? Quizá tal discriminación se deslizaría fácilmente hacia el error porque, a diferencia de los huevos, los pollos cambian por completo su aspecto de un día a otro. Además, la discriminación del pollo podría constituir una ventaja selectiva menor que la distinción del huevo, porque el patrón que advierte la presencia de un huevo parásito puede todavía salvar a su puesta; sin embargo, en el estadio de pollo resulta tal vez demasiado tarde. Pero no se han desvanecido todas las dudas que plantea la falta de discriminación del pollo: en patrones de otros parásitos de incubación, cuyas crías parásitas se desarrollan junto con las de los patrones (como en los pinzones *Vidua*, parásitos de pinzones de la familia estríldidos), las crías parásitas imitan a la perfección el aspecto de las crías del patrón. Son observaciones que abogan por la capacidad de discriminación del pollo en algunas especies de patrones.

El pollo de cuco es alimentado con los mismos tipos de presas que los carriceros comunes aportan a su pollada: moscas, chinches, orugas y otros artrópodos. Se aprovisiona también de una tasa parecida a la de una pollada media de carriceros (tres o cuatro pollos). De ello se infiere que su desarrollo está adaptado a una tasa de alimentación soportable por los patrones.

Las hembras de cuco defienden territorios donde ponen, por término medio, ocho huevos al año. Ponen en días alternos y en general en dos tandas, separadas por un descanso de varios días. Si los nidos del patrón favorito escasean, la hembra puede dirigirse a patrones alternativos. Por ejemplo, los cucos de carricero común ponen a veces en los nidos de carricerines comunes *(Acrocephalus schoenobaenus)*. Se sabe también que la hembra de cuco saquea nidos que encuentra en el estadio de incubación o de pollo, que se hallan demasiado avanzados para el parasitismo. Este ataque induce a los patrones a iniciar una puesta de sustitución, aumentando así la disponibilidad de nidos adecuados.

Sospechábamos que los cuclillos eran responsables de gran parte de la depredación de nidos de carriceros comunes en Wicken Fen. Dos razones nos movían a suponerlo: en primer lugar, muchas puestas desaparecían sin dejar en el nido los rastros de perturbación que denuncian la acción de cuervos y otros grandes depredadores aviares; en segundo lugar, la mayoría de los nidos estaban sobre el agua y resultaban inaccesibles para mamíferos depredadores. Si eran los cucos quienes depredaban los nidos de carricero común, resultaba evidente que les saldría a cuenta recordar la localización de los nidos que habían parasitado y procurar no estropearlos. De acuerdo con ello planteamos la hipótesis siguiente: si el cuco constituía un depredador importante, entonces los nidos que portaran un huevo de cuco sufrirían *menos* depredación que el promedio. Hipótesis que corroboraron los datos: sólo el 22 por ciento de los nidos parasitados sufrieron depredación en el estadio de huevo, frente al 41 por ciento de los nidos sin parasitar, una diferencia estadísticamente significativa.

Abordamos luego las otras tres especies principales de patrones de cuco en Gran Bretaña. A imagen del carricero común, lo mismo bisbitas comunes que lavanderas blancas enlutadas tendían a rechazar huevos artificiales que discreparan de los propios en el color, en tanto que aceptaban con mayor probabilidad los modelos que imitaban bien el tipo puesto por el cuco de su propia *gens*. Dicho de otro modo: la discriminación del patrón ha condicionado la selección de los huevos miméticos de los cucos de bisbita y de lavandera.

¿Cómo explicar, pues, la total ausencia de mimetismo por parte de los cucos de acentor común? La cuestión le interesaba ya a Gilbert White, quien escribió en *The Natural History and Antiquities of Selborne* (1770): "Uno se pregunta... con razón, por qué los gorriones de seto [acentores comunes]... se sienten inducidos a empollar el huevo del cuco sin escandalizarse del tamaño enormemente desproporcionado del huevo espúreo; pero estas bestias, supongo, no deben entender mucho del tamaño, color o número."

Nuestros experimentos encontraron una buena razón para explicar por qué el cuco de acentor común no ha desarrollado un huevo mimético; sencillamente, no lo necesita. El acentor común acepta huevos de cualquier color. ¿Acaso era ciego para los colores el acentor común? Descubrimos que aceptaba incluso modelos

blancos o negros. Más: no se limitaban a transigir con un huevo extraño y aceptaban puestas enteras. Estas observaciones dejan abierto el problema de por qué los cucos de acentor común ponen un tipo de huevo distintivo, de tonalidad intermedia entre los huevos de un cuco de carricero común y los de un cuco de lavandera blanca enlutada, y no más variables que los huevos de otras *gentes*.

El futuro habrá de resolver también la cuestión relativa a la permanencia de los caracteres distintivos de las diferentes *gentes*. Podría deberse a que las hijas pongan el mismo tipo de huevo que su madre, de manera que un cuco hembra que haga eclosión de un huevo verdoso, por ejemplo, pondrá, asimismo, huevos verdosos. Por parte del cuco, se trataría entonces de cómo seleccionar el patrón correcto, en este caso el carricero común, a los huevos del cual se asemejaría el suyo. Un mecanismo verosímil sería que la cría de cuco recibiera la impronta del patrón que lo atiende y, luego, cuando adulta, elegiría la misma especie patrón a quien parasitar. La impronta aseguraría así que la semejanza entre huevo de cuco y del patrón persistiera durante generaciones. Nos hallamos sometiendo a comprobación experimental esta idea mediante la transferencia de cucos de una *gens*, recién salidos del huevo, al nido de una especie normalmente parasitada por otra *gens*, para ver si el cuco trocado, alcanzada la edad adulta, prefiere parasitar a la nueva especie de patrón.

Si machos y hembras reciben la impronta de su patrón, podría esperarse que hubiera cuatro razas genéticamente distintas de cuclillo en Gran Bretaña. No pueden citarse, sin embargo, diferencias de aspecto que confirmen esa posibilidad. Ahora bien, si sólo en las hembras se acuña la impronta, habría cuatro estirpes femeninas distintas, y los cruces con los machos mantendría la unidad de la especie. En este supuesto, las *gentes* deberían diferir con respecto al ADN de las mitocondrias (orgánulos intracelulares implicados en el metabolismo energético), que se hereda por vía materna, pero no en el ADN de los núcleos, que se transmite de ambos progenitores. Estamos estudiando estas diferencias genéticas entre *gentes* con Lisle Gibbs, de Queen's University, de Ontario.

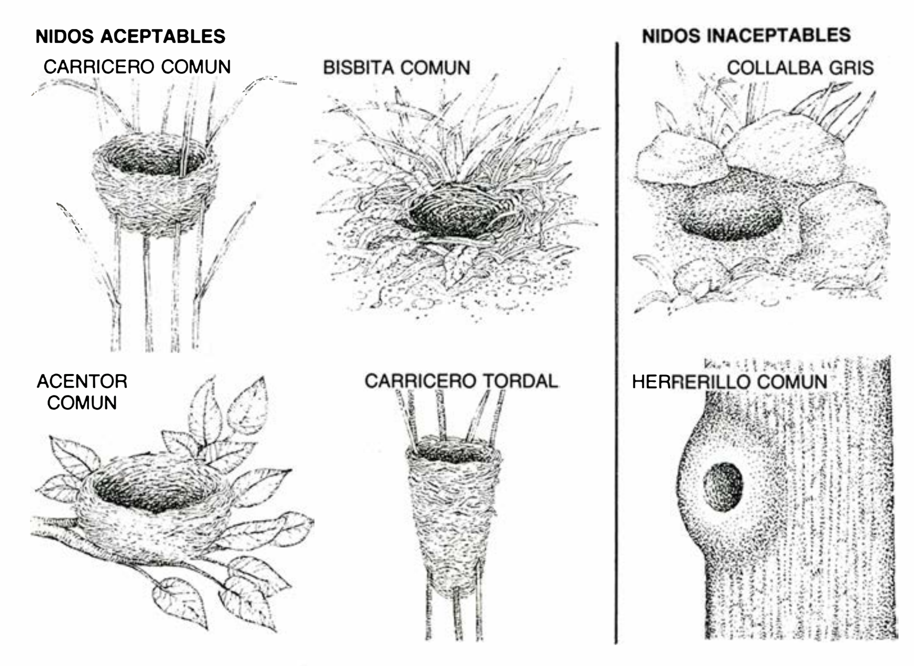
Volvamos a la segunda gran pregunta formulada al principio: ¿cómo evolucionan los patrones en respuesta a los cucos? La discriminación del



8. HUEVO DE CUCO, que destaca entre los del acentor común. Los acentores, sin embargo, lo aceptan como si fuera propio. Tan pobre mimetismo por parte del parásito y tamaña tolerancia por parte del patrón sugieren que nos hallamos ante una relación evolutiva reciente. Esta hipótesis viene sustentada por diversas reconstrucciones de la historia ecológica de las islas Británicas.



9. POLLO DE CUCO DE CARRICERO COMUN. Todavía ciego, carga sobre su dorso los huevos de sus patrones; lo hace de uno en uno; después, los echará fuera del nido, para quedarse solo.



10. DISCRIMINACION DEL HUEVO y su relación con la idoneidad de dietas y domicilios para los cucos. Estos se alimentan de invertebrados y necesitan nidos abiertos. Las aves que comparten esa dieta y forma de anidamiento tienden a rechazar los huevos extraños. Las especies que comen semillas o anidan en agujeros aceptan cualquier huevo. De las observaciones se infiere que el rechazo del patrón evoluciona en respuesta al parasitismo por parte de los cucos. (Dibujos de P. J. Wynne.)

huevo que hemos observado en los carriceros comunes, bisbitas comunes y lavanderas blancas enlutadas, ¿ha evolucionado en respuesta directa ante el parasitismo del cuco? Si es así, ¿podría la falta de discriminación por parte de los acentores comunes significar que estos pájaros son víctimas relativamente recientes, que andan atrasadas en sus contraadaptaciones a una nueva presión selectiva?

En busca de respuesta, comparamos el comportamiento de una amplia variedad de paseriformes (pájaros canoros que constituyen más de la mitad de todas las especies actuales de aves) frente a modelos de huevos de cuco. Empezamos por las especies que constituían patrones adecuados para los cucos, es decir, las que poseen nidos abiertos, accesibles a una hembra ponedora de cuco, y que alimentan a sus crías con invertebrados que sostienen en el pico. Resultó que tales especies exhibían grados variables de rechazo de los modelos artificiales ajenos. En algunas, así el escribano palustre y el papamoscas gris *(Muscicapa striata)*, el rechazo discriminador era incluso más exigente que en los patrones favoritos usuales. Esta discriminación inesperada puede proporcionar la clave del pasado evolutivo de tales especies.

Si el rechazo evolucionara instado exclusivamente por el parasitismo del cuco, entonces (planteamos) las especies que no sirvieran para patrones tampoco rechazarían huevos distintos de los suyos, por la sencilla razón de que no habrían tenido ninguna relación con el cuco. Patrones inservibles eran especies que, aunque su dieta fuera adecuada, anidaban en agujeros o madrigueras, y especies que alimentaban a sus crías con semillas. Nuestro supuesto de partida se vio sólidamente confirmado: ocho de las nueve especies inadecuadas inservibles con que experimentamos no mostraron ningún rechazo, o fue muy débil, de los huevos distintos de los suyos.

Ciertas comparaciones entre especies emparentadas ofrecieron particular interés. De los cuatro pinzones (de la familia Fringílidos) con que trabajábamos, tan sólo el que alimenta a su cría predominantemente con invertebrados y es, por tanto, patrón adecuado para el cuco (el pinzón vulgar, *Fringilla coelebs*), mostró un fuerte rechazo. Los tres patrones inapropiados, que alimentan a sus crías con semillas sobre todo (el verderón común, *Chloris chloris*, el pardillo común, *Acanthis cannabina*, y el camachuelo común, *Pyrrhula pyrrhula*), no rechazaron al intruso. De los dos papamoscas (de la familia Muscicápidos), el gris (cuyos nidos abiertos son explotados por los cucos) ejerció un fuerte rechazo, mientras que el papamoscas cerrojillo *(Ficedula hypoleuca)*, cuyos nidos hechos en agujeros son inaccesibles para los cucos, se manifestó indiferente. Este rosario de pruebas demuestra que el rechazo no guarda relación con el grupo taxonómico al que la especie pertenece, sino con la experiencia evolutiva que, con respecto a los cucos, ha tenido la especie.

De nuestro estudio de etología comparada se desprende que, antes de que los cucos parasitaran a los bisbitas comunes, las lavanderas blancas enlutadas y otros patrones favoritos actuales, estas especies no rechazaban los huevos de aspecto extraño. No nos es factible introducirnos en el túnel del tiempo para observar que así ocurrió, pero sí podemos realizar el experimento que mejor se aproxima a esa solución ideal. El cuco cría desde Europa occidental al Japón, pero no en Islandia, donde es un divagante raro y donde nunca parece haberse asentado. Islandia tiene poblaciones de bisbitas comunes y de lavanderas blancas (de las que la lavandera blanca enlutada es una subespecie), ninguna de ellas parasitadas. Por tanto, nos llevamos nuestros huevos artificiales a Islandia.

Las poblaciones islandesas tienen densidades de cría reducidas, lo que nos obligó a trabajar duro hasta encontrar nidos. Pero el esfuerzo valió la pena. Bisbitas y lavanderas mostraron mucha menor intransigencia ante los huevos foráneos que los miembros de las poblaciones parasitadas de estas mismas especies en Gran Bretaña. Sí rechazaron algunos de los modelos de color azul claro; a diferencia de las especies patrón inadecuadas, no eran, pues, absolutamente ingenuas. Quizá las poblaciones islandesas derivan de poblaciones parasitadas de otras partes de Europa y han heredado de sus antepasados parte de la discriminación ante los huevos.

Los experimentos con modelos de huevos nos permitieron reconstruir las fases verosímiles de evolución recorridas por el cuco y sus patrones en esa carrera armamentística. En un principio, una especie apenas muestra rechazo, si es que lo manifiesta, de huevos extraños. El parasitismo del cuco promueve, en el patrón, la selección de la capacidad discriminatoria ante huevos distintos de los propios. Semejante poder discernidor insta, en el cuco, la selección del mimetismo de sus huevos. El mimetismo del cuco demanda, a su vez, la evolución selectiva de los patrones, lo que redunda en una discriminación más fina por parte del patrón, que induce un mimetismo todavía más exacto. Los grados variables de rechazo y de mimetismo del huevo que muestran las diferentes especies de patro-

nes y las distintas *gentes* de cuclillo pueden, es nuestra creencia, representar diversas fases de esta carrera de armamentos.

El acentor común, con su absoluta falta de discriminación, vendría a constituir un ejemplo de un estadio particularmente temprano (desde luego, en la escala de tiempo evolutivo). Shakespeare se refirió al parasitismo que sufren los acentores, conocidos más comúnmente como gorriones de seto, hace 385 años, en *El rey Lear* (acto 1, escena 4), en el que el Bufón advierte a Lear que sus hijas pueden llegar a ser su ruina, como cuando "el gorrión de seto alimenta al cuco durante tanto tiempo que, al final, su cabeza es arrancada de un bocado por su cría". Más antigua aún es la referencia de Chaucer en *La conversación de las aves* (hacia 1382), donde el cuco es denostado en los siguientes términos: "Tú, asesino del gorrión de seto en la rama que te procreó."

A pesar de esos 600 años, por lo menos, en que ha sido una víctima, sólo el 2 por ciento de los nidos de acentores británicos están parasitados actualmente. A tasa tan reducida se necesitarían miles de generaciones (y de años) para que la capacidad discriminatoria se extendiera por la población del patrón. La mayor parte de Gran Bretaña estaba cubierta por el bosque primigenio hace de 6000 a 8500 años, y el acentor no suele medrar en ese ambiente. Posiblemente no se convirtió en víctima del cuco hasta que se produjo el desbroce parcial de los bosques, hace entre 2500 y 6500 años, en el intervalo que los cálculos sugieren que haría falta para la propagación de esa facultad seleccionada.

El carricero común, el bisbita común y la lavandera blanca enlutada podrían representar en Gran Bretaña un estadio más avanzado en la carrera de armamentos: aquel en que los patrones rechazan los huevos foráneos y las *gentes* de cuco han desarrollado huevos miméticos bastante exactos. En Europa central, con áreas más amplias de hábitat sin alterar, hallamos ejemplos todavía mejores de mimetismo de los huevos por parte de los cucos, lo que quizá refleja una discriminación del patrón aún más fina. Entre ellos se encuentran los hermosos huevos azules miméticos que pone la *gens* de cuco especializada en colirrojos reales *(Phoenicurus phoenicurus)* y el mimetismo maravilloso en su puntillismo que ofrece la *gens* del carricero tordal *(Acrocephalus arundinaceus)*, en el que cada mancha del huevo del patrón parece haber sido copiada a la perfección. En Asia central y en Africa, donde probablemente se originaron los cucos y donde coexisten varias especies, cada una especializada en patrones distintos, existen ejemplos de mimetismo tan perfecto que la única manera fiable de reconocer el huevo del parásito es pesar el cascarón. Cabe presumir que en tales casos la interacción entre parásito y patrón ha estado funcionando desde hace más tiempo.

En conclusión, nuestros experimentos revelan la existencia de verdadera coevolución. Los cuclillos han respondido a sus patrones: el proceder de su oviposición parece en gran parte diseñado para desbaratar las defensas del patrón; el refinamiento del mimetismo del huevo de las diferentes *gentes* refleja la acuidad discriminante de los patrones respectivos, quienes, a su vez, han respondido a los cucos: las especies sin historia de parasitismo no rechazan huevos intrusos y las poblaciones de especies parasitables que llevan tiempo aisladas de los cucos se muestran menos intransigentes que las poblaciones hostigadas.

Quizá no se limite la evolución a la perfección del mimetismo de uno y la discriminación del otro. Nuestros experimentos abonan otra posibilidad. Entre los patrones adecuados, algunas especies que en la actualidad no son nunca parasitadas, o lo son raramente, presentan un rechazo de huevos extraños más enérgico que los patrones preferidos hoy por el cuco. De acuerdo con esas observaciones, las especies conservarían las cicatrices de una carrera de armamentos que sus antepasados realizaron contra el cuco hace mucho tiempo. Quizá desarrollaron una discriminación tan fuerte que provocaron la extinción de sus *gentes* de cuco o bien les obligaron a encaminarse hacia otros nidos, hacia especies que hasta entonces la lucha no había endurecido.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE CUCKOO'S SECRET. Edgar P. Chance. Londres, Sedgewick & Jackson, 1922.

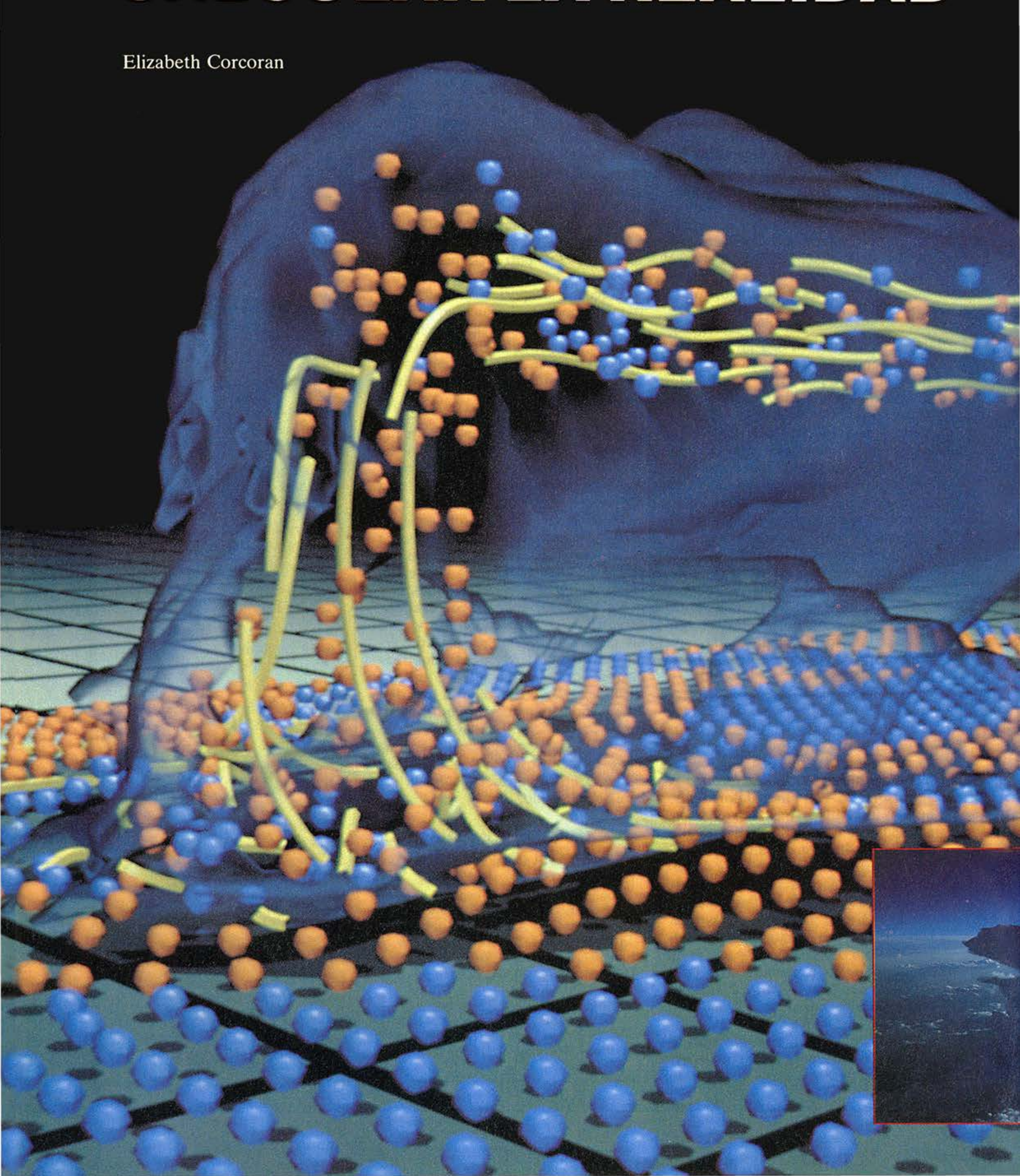
AN EXPERIMENTAL AND TELEONOMIC INVESTIGATION OF AVIAN BROOD PARASITISM. Stephen I. Rothstein en *Condor*, vol. 77, n.º 3, págs. 250-271; 1975.

THE CUCKOO, Ian Wyllie. Londres, Batsford, 1981.

CUCKOOS VERSUS REED WARBLERS ADAPTATIONS AND COUNTERADAPTATIONS. N. B. Davies y M. de L. Brooke en *Animal Behaviour*, vol. 36, parte 1, págs. 262-284; 1988.

CALCULAR LA REALIDAD

Elizabeth Corcoran



En ruptura con diseños tradicionales, los arquitectos de superordenadores se aprestan a construir máquinas cuya potencia sea suficiente para transformar las ciencias.



UN INSTANTE de la vida de una fuerte tormenta, simulado con un superordenador. Nos muestra la turbulencia del aire en el seno de una masa nubosa de unos 45 minutos de edad.

Para cartografiar el flujo de aire, la simulación libera en la senda de la tormenta partículas trazadoras ingrávidas desde un plano horizontal, situado más o menos a un kilómetro sobre el suelo. Las partículas se colorean de naranja al subir y de azul al descender. Las cintas amarillas que portan algunas partículas muestran la trayectoria del aire durante los 500 segundos anteriores.

Los investigadores del Centro Nacional de Aplicaciones de Supercomputación y del departamento de ciencias atmosféricas de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign confían en que estas simulaciones permitirán comprender mejor las tormentas y conducirán a predicciones más exactas del comportamiento de las tormentas reales.

Sobre las llanuras y labradíos de Wisconsin se tiende límpido un cielo otoñal tardío, un cielo que hace pensar en una pizarra en blanco. Poco más alcanzan a ver desde las ventanas de sus oficinas los ingenieros y arquitectos informáticos de Supercomputer Systems, Inc., de Eau Claire, al disponerse a llenar sus tableros de diseño con planos del superordenador que confían llegue a ser el más veloz del mundo.

Empero, aunque SSI aspire a volar tan alto,es sólo un polluelo al que apenas despuntan las plumas. A pocos kilómetros de allí, en Chipewa Falls, se encuentra la empresa campeona en el arte de la supercomputación, la Cray Research, Inc. En ella, los operarios que ensamblan la próxima generación de superordenadores Cray lucen ufanos chaquetas azul celeste, bordadas con la leyenda ''Cray: Los ordenadores más rápidos del mundo''. No obstante, en este mismo momento tal título se les está escapando de las manos.

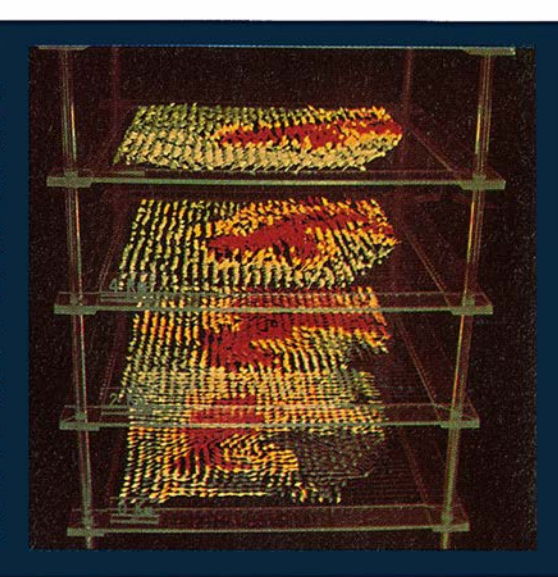
A varios cientos de kilómetros al sur, en la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, los investigadores ven en el cielo un problema muy diferente. Les preocupan sus perturbaciones, y más concretamente, las tormentas convulsivas. Provistos de la enorme potencia de cómputo de varios superordenadores, los investigadores se esfuerzan por desenmarañar las causas de que ciertas tormentas lleguen a adquirir tanta gravedad. Mas sus ordenadores carecen todavía de agilidad suficiente para retratar a los tornados, tormentas pequeñas y malignas, responsables de numerosas víctimas humanas y daños materiales. ¿Cuándo podrán predecirlos?

Desde la perspectiva de los proyectistas de superordenadores, la mejor descripción de su décatlon está dada por las tres T: un teraflops (10^{12} = 1 billón de operaciones en "coma flotante" por segundo), una memoria de un teraocteto y una velocidad de comunicación de datos de un teraocteto por segundo. Ello supone multiplicar por 1000 la capacidad en cada uno de estos conceptos de las máquinas hoy existentes. Casi todos los expertos opinan que, para conseguir prestaciones de nivel "tera" como las mencionadas, será imperativo abandonar los diseños tradicionales, que tratan los problemas de modo secuencial, paso a paso. Las teracomputadoras cobrarán algo del sabor de la computación en paralelo, en la cual, para resolver problemas ingentes, se descomponen primero en piezas, que se vuelven a ensamblar más tarde.

Nunca, desde la construcción del primer ordenador en los años cuarenta, ha estado la organización –la "arquitectura"– de los ordenadores tan abierta a reinterpretación y reconsideración de tamaña radicalidad. Alrededor de una docena de competidores, entre los que figuran SSI y Cray Research, están trazando planes para las generaciones venideras de ordenadores de máximas prestaciones.

MODELOS EN EVOLUCION

Las simulaciones de las tormentas han constituido una mina de información. En 1982, Peter S. Ray y Robert B. Wilhelmson obtuvieron un retrato del viento y la precipitación valiéndose de un modelo material. Tendieron entre capas de plexiglás alambres que se intersecaban, a los que pegaron flechitas de plástico moldeado (*izquierda*). En 1985, Joseph B. Klemp se valió de un ordenador y de un equipo de reproducción en color para crear imágenes estáticas de una tormenta (*centro*). En 1987, trabajando con un superordenador y un equipo de animación gráfica Wilhelmson reprodujo la evolución de una tormenta (*derecha*).



Se trata de una lucha neodarwinista en la que la supervivencia no va a depender sólo de la mera construcción de la máquina más rápida. Y se da además una perversa circunstancia en contra: quienes mejor partido podrían sacar de la vasta potencia computacional de los superordenadores que están a punto de surgir no son necesariamente gurús de la informática. Son, por el contrario, expertos en sus propias disciplinas científicas, con escasa inclinación a dedicar tiempos enormes a la programación de ordenadores. La construcción de un ordenador capaz de lograr un teraflops (10^{12} operaciones en coma flotante por segundo) es sencilla en comparación con el diseño de un sistema fácilmente utilizable por los investigadores.

Robert B. Wilhelmson, especialista

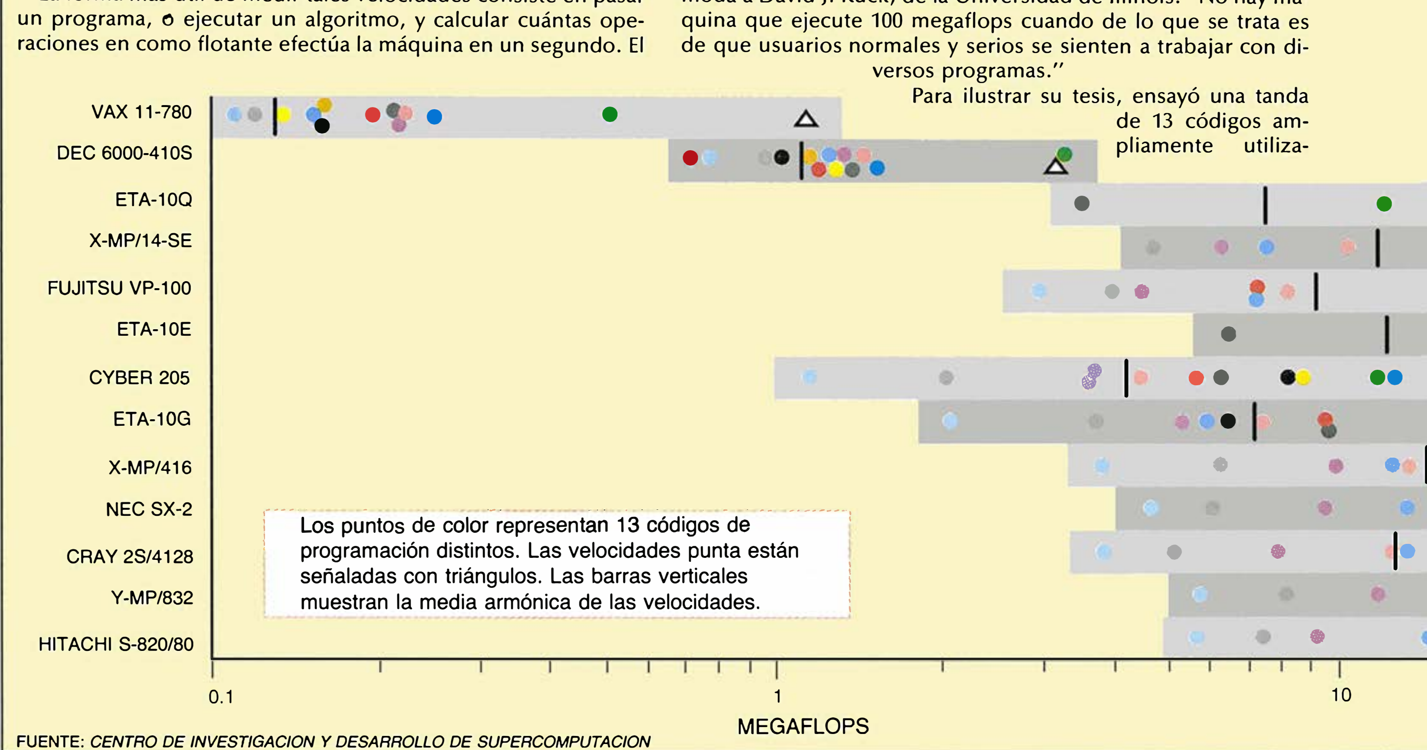
¿QUÉ SIGNIFICA "RAPIDO"?

Pidamos a una docena de usuarios y fabricantes que ordenen por velocidad las máquinas más rápidas. La polémica está garantizada.

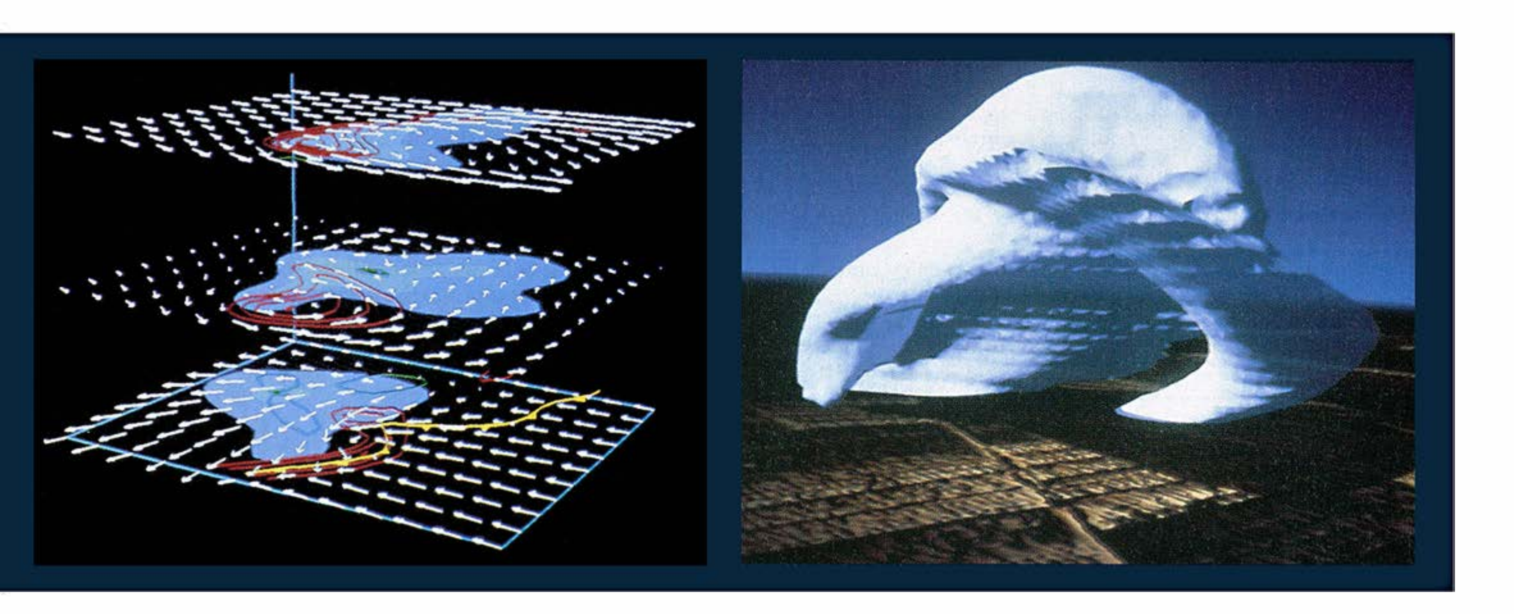
La forma más útil de medir tales velocidades consiste en pasar un programa, o ejecutar un algoritmo, y calcular cuántas operaciones en como flotante efectúa la máquina en un segundo. El problema está en que sutiles diferencias en la codificación harán que los superordenadores se muestren notablemente más rápidos o más lentos.

Tal variabilidad en el rendimiento de los ordenadores incomoda a David J. Kuck, de la Universidad de Illinois. "No hay máquina que ejecute 100 megaflops cuando de lo que se trata es de que usuarios normales y serios se sienten a trabajar con diversos programas."

Para ilustrar su tesis, ensayó una tanda de 13 códigos ampliamente utiliza-



FUENTE: *CENTRO DE INVESTIGACION Y DESARROLLO DE SUPERCOMPUTACION*



en física atmosférica del Centro Nacional de Aplicaciones de Supercomputación en la Universidad de Illinois, tiene a sus órdenes un Cray 2, teóricamente capaz de casi 2 gigaflops (2000 millones de operaciones en coma flotante por segundo). Wilhelmson construyó con él una breve película animada de la evolución de una tormenta. Sus colegas y él tuvieron que dedicar un tedioso año a la preparación de ese vídeo. Si dispusieran de un terasuperordenador, podrían preparar esa película en unas pocas horas, cambiar los parámetros y volver a hacer funcionar la simulación. Y no es el único que ansía una más vigorosa musculatura computacional. Va para diez años que el premio Nobel Kenneth Wilson formuló una colección de cuestiones científicas que presentaban "desafíos grandiosos" a la comunidad investigadora. Cartografiar el genoma humano era uno de ellos; otro, la predicción de cambios climáticos con decenios e incluso siglos de anticipación. Para afrontar tales cuestiones, se precisan prestaciones informáticas de nivel tera.

En 1992, Cray Research comenzará a entregar las máquinas de su siguiente generación, la Y-MP/16, que osten-

dos en distintos ordenadores, entre los que figuraban las 11 supercomputadoras y las dos estaciones de trabajo mencionadas a la izquierda. Los datos muestran gran variabilidad: la mayoría de los superordenadores llegan a hacer funcionar ciertos programas 100 veces más rápidamente que otros. Superordenadores comparables ejecutan el mismo código a velocidades dispares. Y ninguna de las supermáquinas se aproximó siquiera a su hipotética velocidad punta.

"La industria suele, en gran medida, hacer caso omiso de estos problemas, que para el usuario constituyen un desastre", afirma Kuck acusadoramente. "Las compañías empiezan por negar que así suceda. Después, tras muchas discusiones, te dicen: es cierto, sí; pero, ¿por qué le molesta? Estas máquinas son difíciles". Y Kuck replica: nadie ajeno a la comunidad investigadora tiene la paciencia necesaria para habérselas con una conducta tan impredictible. Los usuarios prefieren, en cambio, la predictibilidad de las estaciones de trabajo.

"Así es la ingeniería, por naturaleza", responde C. Gordon Bell. Los ordenadores se diseñan con diferentes grados de paralelismo, afirma, y otro tanto ocurre con la programación. Los programas que no sacan pleno partido de la capacidad de paralelismo de una máquina harán que ésta funcione más lentamente, añade. En consecuencia, Bell carga el acento en la necesidad de mejorar la preparación de los diseñadores de programas.

Kuck confía arrojar algo de luz sobre las causas de la variabilidad con ayuda de un ordenador llamado Cedar, que él mismo ha construido y que está dotado de 32 procesadores; con él, emulará otras máquinas. "Los ordenadores en paralelo no sobrevivirán jamás, a menos que los usuarios puedan lograr conductas predictibles", opina. Y Bell replica: "La predictibilidad constituye una meta errónea. Máquinas y compiladores deberían aspirar a un rendimiento teórico lo más alto posible para cualquier problema."



Diseño teraflops en ocho lecciones

El diseño de un superordenador capaz de ejecutar un billón de operaciones por segundo obliga a los investigadores a habérselas con un dédalo de problemas. David A. Patterson ha confeccionado a petición de *Investigación y Ciencia* una primera aproximación a la construcción de un ficticio teraordenador, el "TF-1"

1. ¿Qué cuestiones no pueden abordarse, por su tamaño, con los superordenadores ya existentes?
El diseñador ha de estar pensando en cierto número de problemas. También ha de tener en cuenta las "grandes cuestiones", sin olvidar la cartografía del genoma humano y la predicción de los cambios climáticos a escala global.

2. ¿De qué capital se dispone?
Los superordenadores actuales cuestan entre 1000 y 3000 millones de pesetas, y ejecutan entre el 0,1 y el 0,5 por ciento de un teraflops. Mientras el presupuesto de desarrollo se encuentre en el intervalo que media entre los 5000 y los 50.000 millones de pesetas, el diseñador no tiene que preocuparse por el dinero... todavía.

3. ¿Cuántas son las aplicaciones por cuya solución los clientes estarían dispuestos a pagar más de 2500 millones de pesetas?
Si la lista es vacía, el proyectista está condenado de antemano. De haber sólo una aplicación, el proyectista debería estudiar la construcción de una arquitectura "a la medida" para resolver tal problema a un coste muy inferior. Suponiendo que el proyectista pueda imaginar una colección de aplicaciones que valgan la pena, debería proseguir el esfuerzo por construir una TF-1 de uso general.

4. Defina el grado de paralelismo de las aplicaciones.
A grandes rasgos, caracterizar el paralelismo significa descubrir la repetición en un problema. Por ejemplo, la modelización del flujo de aire puede ser un problema de gran paralelismo, pues el programador necesita aplicar sólo una fuerza a una multitud de partículas de aire. Por el contrario, una serie de ecuaciones no lineales, cada uno de cuyos resultados ha de inyectarse en la ecuación siguiente, exhibe escaso paralelismo.

5. ¿Cuál es el grado medio de paralelismo de los problemas?
Supongamos que una aplicación consiste en modelizar el comportamiento de cuatro partículas impulsadas por una misma fuerza. Pocas serán las razones para utilizar una máquina que tenga, por ejemplo, 8 o 16 procesadores para resolver este problema. La construcción de tal máquina puede costar el doble que la de una máquina más sencilla, y no resolver los problemas con doble rapidez.

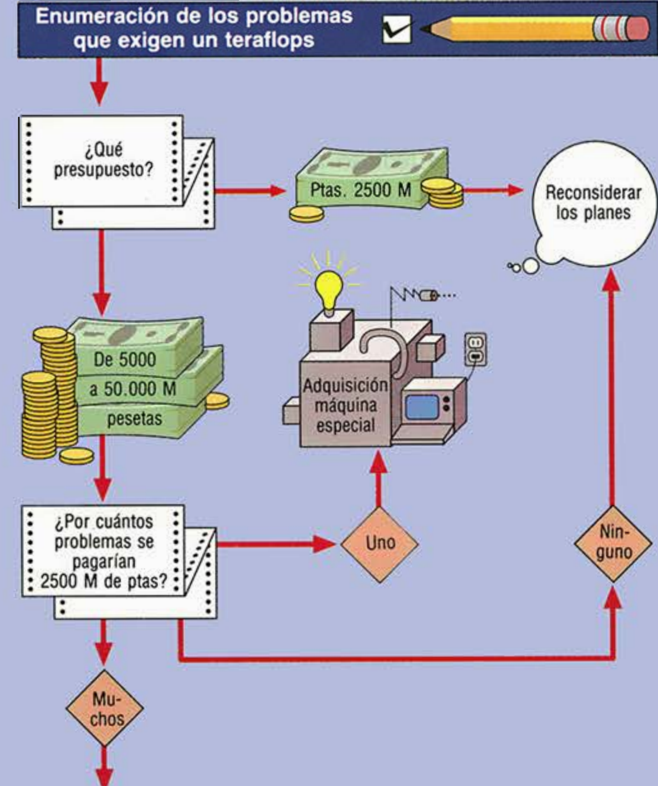
Si los problemas son descomponibles entre 10 procesadores, cada uno tendrá que ejecutar su porción de aplicación a la velocidad de unos 100 gigaflops para poder entre todos resolver el problema a velocidad de un teraflops. Dicha velocidad es de 25 a 100 veces mayor que la del más veloz de los ordenadores actuales. Es improbable que los procesadores alcancen esas velocidades antes de concluir el decenio. Las aplicaciones con 10.000 elementos paralelos pueden resolverse con millares de procesadores de 100 megaflops. Tales velocidades deberían estar al alcance de los microprocesadores en un plazo de cinco años.

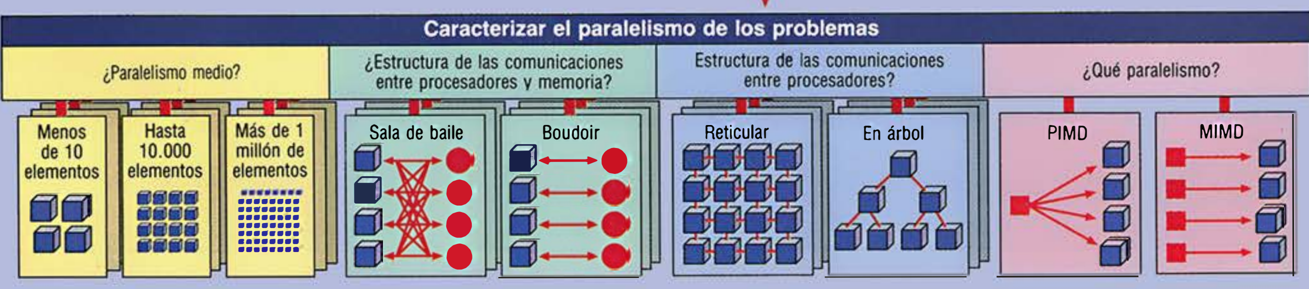
Para tratar más de un millón de elementos en paralelo, el proyectista ha de decidir si resultaría más económico utilizar un millón de diminutos procesadores encapsulados a razón de 100 por microcircuito o si es mejor utilizar 10.000 unidades más potentes, ubicadas cada una en un microcircuito, y capaces de actuar en paralelo.

6. ¿Con qué frecuencia los procesadores han de recobrar datos de bancos de memoria particulares?
Una máquina que fuese 1000 veces más veloz que los superordenadores actuales tendría que disponer de una memoria que recobrase información unas 1000 veces más rápidamente que las actuales, amén de ser 1000 veces mayor. Pero cuanto mayor es la memoria, más lento es el ordenador. El proyectista del TF-1 tal vez optaría por 1000 memorias independientes de operación simultánea.

De ser verosímil que el grado de comunicación o compartición entre actividades paralelas sea irregular, el proyectista podría recurrir al método "salón de baile": los procesadores a un lado, todas las memorias al otro y luego se emparejan. Pero al aumentar el número de procesadores, el diseño se torna superlativamente complejo.

En caso de que las necesidades de comunicación resultasen mínimas, el proyectista puede dividir la memoria en tantas piezas como procesadores y asociar una pieza a cada procesador: es la configuración de "boudoir".





7. ¿A qué pauta obedece la comunicación entre procesadores?

Es preciso enlazar también los procesadores de modo que puedan comunicarse entre sí e intercambiar información o coordinar sus actividades.

El mecanismo más sencillo y económico de interconexión es el *bus*, una serie de líneas que conecta entre sí todos los elementos. Dado que, en un bus, sólo puede haber en cada instante un dispositivo que esté transfiriendo datos o instrucciones, este método resulta demasiado restrictivo al enlazar muchos procesadores. En la actualidad, el sistema más caro es el conmutador transversal, que proporciona una vía explícita entre cada dispositivo de comunicación; tal sistema resulta prohibitivo si hay que conectar millares de procesadores.

Entre estas dos soluciones extremas, existen muchos e imaginativos métodos de conexión donde se juega con el número de transferencias simultáneas de información, la velocidad de tales transferencias y el costo de las conexiones. Un ejemplo es la parrilla, en la cual cada procesador envía información al vecino más cercano. La generalización de esta idea a tres dimensiones conduce al diseño hipercúbico. Un diseño dendrítico (en árbol) transfiere información por diversas ramas.

En estas topologías más restrictivas, para resolver los problemas, al programador puede serle imprescindible conocer la interconexión de los procesadores de la máquina. Se trata de seleccionar una topología capaz de manejar una gama amplia de aplicaciones con diferentes grados y pautas de comunicación.

8. ¿De qué naturaleza es el paralelismo? ¿De qué modo han de ser controlados los procesadores?

El carácter que revista el paralelismo de los problemas potenciales puede ayudar al proyectista a decidir la forma en que los programas han de controlar las operaciones de la máquina. Si el paralelismo de la aplicación puede controlarse con una única secuencia de instrucciones que opera sobre muchos conjuntos de datos, el proyectista podrá valerse de una arquitectura de corriente monoinstrucción multidato (MIMD). En las máquinas monoinstrucción, una memoria solitaria suministra todas las instrucciones.

La sincronización MIMD posee puntos fuertes y otros débiles. La sincronización implícita puede facilitar la tarea del programador, haciendo que la máquina MIMD ofrezca el mismo aspecto que las de procesamiento serial. Pero la sincronización puede ser excesiva, si algunos fragmentos de las aplicaciones requieren procesadores diferentes para realizar distintas tareas. En el caso de que las aplicaciones exigieran muchos juegos independientes de secuencias de instrucciones, la arquitectura debería adoptar la forma de ordenador poliinstrucción multi-dato (PIMD). Esta máquina es más general que la variedad MIMD, pero los procesadores PIMD tienen que cerciorarse periódicamente de que están trabajando en armonía con los otros procesadores.

tará una potencia de pico de unos 16 gigaflops y alcanzará los 10 gigaflops. Tales prestaciones distan mucho todavía de un teraflops.

El Y-MP/16 señalará el fin de una era de Cray Research, compañía que dio comienzo a la cultura de la supercomputación. Los enfrentamientos acerca de cuáles han de ser las líneas maestras en que se funde la siguiente generación de superordenadores han reducido la firma a astillas. Seymour Cray, patriarca de la supercomputación y arquitecto de los Cray 1 y 2, llegó a la conclusión de que su siguiente máquina (la Cray 3) habría de alcanzar altas velocidades basándose en un material electrónico más rápido, el arseniuro de galio. Sin embargo, la construcción de los microcircuitos de arseniuro de galio llegó a resultar de una lentitud exasperante y de costo prohibitivo. En consecuencia, hace menos de dos años, Cray cerró su taller de Wisconsin y puso en marcha otra empresa, la Cray Computer Corporation.

La marcha de Cray se produjo tras el abandono de Steve S. Chen, joven diseñador de las series X-MP e Y-MP. Chen se despidió y procedió a fundar Supercomputing Systems cuando los ejecutivos de Cray Research decidieron no dar luz verde a su próxima arquitectura, a la que calificaron de excesivamente ambiciosa. Entretanto, los diseñadores que han permanecido en Cray Research han adoptado un rumbo que se aparta radicalmente de la tradición de Cray, y han emprendido la construcción de un sistema paralelo a gran escala, basado no sólo en unos pocos procesadores, sino en millares de ellos.

Este cisma refleja la división de criterios existente sobre los fundamentos mismos de la supercomputación. Cuando Cray comenzó a diseñar ordenadores, allá por los años cincuenta, puso carne al esqueleto desarrollado una década antes por la ENIAC. Programas y datos quedaban almacenados en forma numérica en una memoria central. Un solo procesador iba interpretando de una en una las instrucciones y procesando los datos. Un reloj interno controlaba la sincronía de las operaciones.

Durante decenios, construir ordenadores más rápidos equivalía a acelerar el reloj; literalmente, reducir el tiempo que media entre instrucciones sucesivas. Al principio resultó fácil: bastaba construir componentes más rápidos. Después, a comienzos de los setenta, las mejoras en velocidad de procesamiento serial se ralentizaron mucho. Pero Cray y su equipo minimizaron las distancias que las señales electrónicas debían recorrer empaquetando más densamente los componentes e idearon técnicas innovadoras de refrigeración de los circuitos para evitar su destrucción por sobrecalentamiento.

Cray empezó también a dar tímidos pasos tendentes al procesamiento en paralelo. En lugar de hacer que fuese un procesador central el encargado de ejecutar en orden secuencial todos y cada uno de los pasos de una tarea, Cray las dividió. Un método conocido por "bombeo" o "tuboducción" escindía al procesador central, convirtiéndolo en una cadena de montaje compuesta por subunidades cooperativas. Una subunidad se ocupa de realizar la primera fase de una tarea y transferir después sus resultados a otra. Mientras la segunda subunidad procede a operar, la primera acomete la tarea siguiente. La tuboducción dio origen al procesamiento vectorial, en el cual los números componentes de una sucesión ordenada (un vector) se sometían simultáneamente a operaciones similares.

Chen, el otro diseñador "estrella" de Cray Research, buscaba alcanzar velocidades superiores atacando en otro frente: incorporando a la tarea más procesadores. El Cray X-MP, desvelado en 1982, constaba de dos procesadores Cray 1 uncidos al mismo yugo. Aunque ambos podían acceder a los datos almacenados en una memoria común, cada uno ejecutaba un flujo distinto de instrucciones. No fue Chen el primero en utilizar multiprocesadores. Mas cuando ambos procesadores trabajaron coordinadamente en un problema, el X-MP de Chen se convirtió en el primer superordenador que logró dejar atrás a los diseños de Seymour Cray.

Esta arquitectura –muchos procesadores uncidos a una memoria central– se convirtió en la forma predominante de diseño de superordenadores. Fue también pregonera de una época en que los superordenadores salieron de unos pocos centros especializados. El acicate para tal cambio provino de la Fundación Nacional de Ciencias de los EE.UU., al decidir la financiación de cinco centros dependientes de universidades consagrados a las aplicaciones de los superordenadores.

Los usuarios de ordenadores empezaron a "visualizar" sus resultados, al serles posible transformar sus datos en gráficos tan informativos como cautivadores. Provistos de estas técnicas, los científicos pudieron empezar a fisgar en dominios que hasta entonces les eran opacos: el interior de las tormentas, las cadenas moleculares, las alas de los aviones. Consiguientemente, la visualización ha co-

RETRATOS DE NEURONAS

El progreso del mal del Alzheimer en una neurona resulta claro cuando los datos celulares recogidos con un microscopio electrónico de alto voltaje quedan reflejados en una imagen en perspectiva. La imagen muestra los lugares precisos donde los pares de filamentos helicoidales (*rojo*), característicos del mal, se ligan al núcleo de la célula (*azul*). La célula muestra también el aparato de Golgi (*blanco*), en el cual los azúcares se suman a las proteínas sintetizadas.

Trabajando en colaboración, David Hessler, Steve J. Young y Mark H. Ellisman crearon una imagen simplificada de la célula en una estación de trabajo gráfica. Tras examinar muchas reorientaciones de la célula, reprocesaron unas cuantas vistas seleccionadas con detalle más fino en un superordenador Cray Y-MP. Las imágenes pudieron después reexaminarse y manipularse mediante una estación de trabajo.



menzado a convertir la computación en un método científico legítimo, en socio de pleno derecho de la experimentación y la teorización. Pero demanda también mayor potencia computacional.

Entretanto, la competencia entre constructores de superordenadores ha comenzado a subir de tono, sobre todo desde que Fujitsu, Hitachi y NEC han decidido saltar al ruedo. Los japoneses, maestros en el diseño de circuitos complejos, se han inclinado más decididamente que Cray por el procesamiento vectorial y la tuboducción, y han producido procesadores más rápidos. El campeón es NEC. Cada uno de los procesadores de su superordenador SX-3 tiene un ciclo de reloj de 2,9 nanosegundos y una velocidad punta de 5,5 gigaflops; los procesadores Cray 2 tienen ciclos de reloj de 4,1 nanosegundos.

Los diseñadores de NEC dudan de que puedan acelerar gran cosa la velocidad de sus procesadores. "A fuer de sinceros, estamos llegando a una encrucijada en el diseño de superordenadores", declara Tadashi Watanabe, un directivo de NEC. "Es probable que, en la próxima generación [de SX], podamos obtener microcircuitos bipolares de más alta densidad. Pero nada sé de la generación siguiente a la siguiente", añade.

Los proyectistas de Fujitsu, que dominan el mercado japonés de superordenadores, son igualmente pesimistas sobre el futuro de los procesadores individuales. La oferta actual de Fujitsu, el VP-2600, ostenta un ciclo de reloj de 3,2 nanosegundos y un pico de 5 gigaflops. "Será muy difícil conseguir un sistema con ciclos de 1 nanosegundo" utilizando integración de circuitos y encapsulados convencionales, concede la empresa.

Mas abandonar el diseño clásico resulta muy oneroso. La adaptación de los programas escritos para procesadores vectoriales a las arquitecturas basadas en el paralelismo a gran escala puede resultar desesperante. Aunque ciertos programas especializados, llamados compiladores, pueden ayudar a los usuarios a rehornear los programas para adaptarlos a los procesadores vectoriales, apenas existen compiladores para arquitecturas con mucho mayor grado de paralelismo. En consecuencia, el paralelismo a gran escala es una transacción entre velocidad y facilidad de uso.

Desde la perspectiva y experiencia de Seymour Cray, renunciar al diseño basado en procesadores vectoriales supondría una grave limitación. Cray no se siente especialmente cómodo con los diseños fundados en el paralelismo a gran escala. Según Neil Davenport, presidente de Cray Computer, "Seymour diría que quiere hacer una única contribución, y que otros tienen por el paralelismo mayor interés y capacidad que él".

A resultas de ello, tanto Cray como los fabricantes japoneses –por separado– confían en extraer mayor velocidad del diseño antiguo sustituyendo los procesadores de silicio por otros de arseniuro de galio. (Dado que los electrones viajan con mayor facilidad a través del arseniuro de galio que a través del silicio, los microcircuitos lógicos construidos con este material deberían ser más rápidos y disipar menos calor que los convencionales.) Cray se propone enlazar entre sí 16 procesadores de GaAs.

Pero el arseniuro de galio es un material que se distingue por su delicadeza, por lo que esta técnica tiene mucho de apuesta. Cray tuvo que erigir una fundición de GaAs junto a su nueva compañía. Si el arseniuro de galio da su avenencia, la compañía confía en poder expedir su primera máquina a finales de este año, con un retraso de dos.

Los constructores japoneses de superordenadores pueden contarse entre las muy escasas organizaciones con suficiente resistencia económica y técnica para perseverar con el arseniuro de galio y con otros materiales novedosos. Empero, incluso ellos están investigando con cautela los nuevos materiales. Bajo los auspicios de un programa de 10 años patrocinado por el Ministerio de Industria y Comercio Internacional (MITI), Fujitsu, NEC y un puñado de fabricantes más construyeron una colección de prototipos rápidos.

La incorporación de tales componentes a los superordenadores va a exigir al menos otro decenio. Incluso así, "inevitablemente, será preciso aumentar el número de procesadores para lograr rendimientos superiores", señala Watanabe.

Pocos lo saben de cierto, pero es muy posible que el esfuerzo más ambicioso por coordinar muchos procesadores vectoriales se esté realizando en SSI. Aunque Chen no ha dado todavía el salto a una arquitectura paralela a gran escala, "todas las decisiones ingenieriles han apuntado en favor del paralelismo", dice Robert A. Walan, directivo de SSI.

En una carrera larga hacia mayores velocidades, el diseño de Cray 3 no resistiría mucho tiempo. Davenport, presidente de la compañía, dice que el superordenador de GaAs será unas 10 veces más rápido que el Cray 2, o sea, de unos 20 gigaflops. Aun cuando Cray encontrase la financiación y la clientela necesarios para el desarrollo de un Cray 4, esa futura máquina sería, verosímilmente, unas 10 veces más rápida... todavía muy lejos de un teraflops. La verdad es que, durante estos últimos años, se ha convertido casi en dogma que únicamente las máquinas basadas en un paralelismo a gran escala, provistas de centenares o millares de procesadores, podrían alcanzar rendimientos situados en un teraflops.

La arquitectura de paralelismo a gran escala consigue su velocidad acoplando un número muy grande de microprocesadores, que emplazan en un mismo microcircuito las funciones de lógica, memoria y comunicaciones. Los procesadores son todavía más lentos que el procesador del Cray 1; pero, al descomponer el problema en

muchas piezas, el conjunto de procesadores es capaz de resolver rápidamente muchos problemas.

Los partidarios del sistema le encuentran muchas ventajas. Los microprocesadores están adquiriendo mayor velocidad, y pueden ser relativamente económicos de utilizar, porque se fabrican muchos tipos de ellos en grandes cantidades para otros productos. Sin embargo, el acoplamiento de tantísimos procesadores plantea una miríada de problemas de diseño.

Aunque no existe un diseño paralelo canónico, Hillis y su Máquina de Conexión se han convertido en portaestandartes de la multitud que propugna el paralelismo a gran escala. La Máquina de Conexión era –y sigue siendo– una arquitectura innovadora. Tomando por modelo al cerebro y su inmensa población de neuronas, Hillis diseñó un ordenador capaz de acomodar más de 64.000 elementos de proceso. Los datos se distribuyen por toda la máquina al emparejar cada elemento de procesamiento con una unidad de memoria.

Las operaciones de los procesadores están controladas por difusión a través de la máquina de instrucciones idénticas. A continuación, todos los procesadores ejecutan simultáneamente sobre sus propios datos las órdenes recibidas. Los procesadores no precisan de coordinación adicional, porque todos están haciendo lo mismo al mismo tiempo. El método utilizado se conoce por diseño de flujo monoinstrucción multidato (MIMD).

Los competidores de Hillis están diseñando arquitecturas con flujo poli-instrucción multidato (PIMD). La arquitectura de Hillis recuerda una línea de coristas moviéndose al unísono; las arquitecturas PIMD hacen pensar más bien en un ballet. Los procesadores ejecutan distintas partes de una misma tarea, al igual que, en un ballet, los bailarines ejecutan movimientos distintos, pero el conjunto interpreta una sola pieza.

Los esquemas poli-instrucción multidato pueden ser, a un tiempo, más flexibles y más complejos que los monoinstrucción. Por ejemplo, las máquinas poli-instrucción pueden tener memorias distribuidas o memorias físicamente compartidas. (Un procesador vectorial es una máquina poli-instrucción de memoria compartida, porque el programador puede dividir la tarea entre todos los procesadores.) Pero las máquinas poli-instrucción exigen también que los diseñadores conecten los componentes de una forma que permita a los procesadores la verificación frecuente de si se mantienen en sincronía.

Hillis confía en que su método acabe por ganar nuevos adeptos, amén de la carrera hacia los teraflops. Nosotros tendremos la primera máquina capaz de un teraflops", dice al referirse a la CM-3, el próximo modelo de la Máquina de Conexión. El diseño les permitirá la construcción de una familia de máquinas para problemas de distintos tamaños. "Tendrá potencia de teraflops en cuestiones específicas que requieran teraflops, como la cromodinámica cuántica", promete.

El procedimiento exacto en que los mecanismos internos se eleven de escala para conseguir el necesario incremento de velocidad sigue estando patentado, informa Hillis. En cualquier caso, la CM-3 no carecerá de competidores. En las afueras de Boston, a unos pocos kilómetros de Thinking Machines (la compañía de Hillis), Memorial Drive arriba, se encuentra Bolt Beranek and Newman (BBN), fundada en las postrimerías de la década de los cuarenta. Hace algunos años, BBN construyó una arquitectura experimental llamada Monarch. La compañía espera ahora poder transformar el Monarch en lo que llama "3T". En lugar de conectar todos los procesadores a sus vecinos más cercanos, BBN utiliza una maraña de conmutadores entre los procesadores y la memoria.

Otra red de conexión bastante popularizada es la conocida por hipercubo. En este diseño, los pares procesador-memoria, llamados nodos, se encuentran situados en los vértices de un cubo y están conectados por las aristas. Desarrolladas en el Instituto de Tecnología de California, se han construido redes hipercúbicas en nCUBE, de Beaverton, así como en Intel y en Thinking Machines.

El proyecto Touchstone de Intel aspira a alcanzar teraflops a mediados del decenio en curso, utilizando un esquema de conexión en malla. En esta topología, los nodos se conectan a sus vecinos más próximos; los nodos se comunican pasándose mensajes. Y la Tera Computer Company, de Seattle, una recién llegada que ya empieza a echar pluma, está alzando esa malla y dándole tres dimensiones. Burton J. Smith, de Tera, distribuye nodos con procesadores y unidades de memoria por toda la malla. Mientras esperan la llegada de datos desde la memoria, los procesadores ejecutan instrucciones correspondientes a

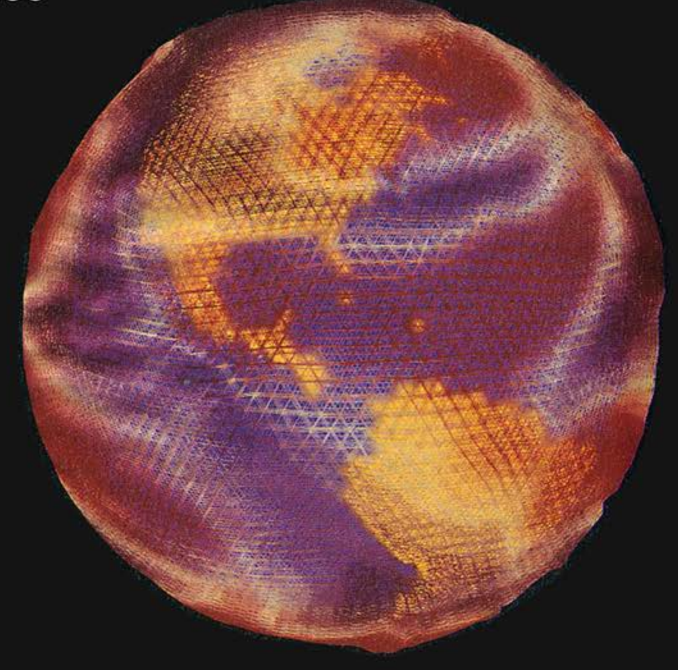
DE LAS EXPLOSIONES AL CAMBIO CLIMATICO

Investigadores del Laboratorio Nacional de Los Alamos han convertido una técnica desarrollada para modelización de explosiones en una simulación del cambio climático.

Este retrato de la capa atmosférica de la Tierra se basa en mallas compuestas por medio millón de tetraedros. Las tierras emergidas se han coloreado de amarillo. Las zonas de más alta energía cinética aparecen en rojo; las de energías menores y mínimas aparecen en blanco y en morado, respectivamente. Dado que esta capa atmosférica no tiene más de 1500 metros medida desde la superficie terrestre, las montañas crean protuberancias en la superficie. El área cubierta por cada tetraedro no excede nunca de los 30 kilómetros de anchura.

Para crear las mallas flexibles, los científicos de Los Alamos utilizaron la Máquina de Conexión, una computadora de paralelismo a gran escala (amén de programación gráfica preparada por Delany Enterprises). En el caso de una perturbación, un huracán, por ejemplo, estas mallas experimentarían una torsión. Los modelos convencionales, que se valen de mallas rígidas de bloques ortoédricos, carecen de la resolución precisa para retratar tales fenómenos locales.

Para calcular las perturbaciones, el programador puede asignar un procesador a cada tetraedro (una programación apropiada permite crear la ilusión de que hay tantos "procesadores virtuales" cuantos sean necesarios.)



otras actividades paralelas; el ordenador actúa así como una máquina de memoria compartida. Hasta ahora la compañía ha logrado simular una versión de 256 procesadores.

Son muchos quienes se muestran en extremo reticentes en lo tocante a sus diseños. "Habrá observado usted que ni siquiera tenemos un rótulo en la puerta", señala Henry Burkhardt III, presidente de Kendall Square Research. Abundan los proyectos universitarios sobre esta materia. El gobierno alemán está patrocinando un proyecto de arquitectura en paralelo denominado Suprenum. El prototipo de su arquitectura descansa en 256 nodos compuestos por equipos de procesadores vectoriales, memoria y unidades de comunicaciones. Los propios fabricantes de superordenadores japoneses están trabajando en una gama de máquinas altamente especializadas con arquitectura en paralelo. Empero, la cuestión a la que todos han de atender no consiste en la velocidad con que sus máquinas puedan ejecutar programas de prueba, sino en si resolverán los problemas de los usuarios. Buscando indicios orientativos, los diseñadores están atentos a los algoritmos (descripciones y ecuaciones matemáticas) que se están desarrollando para máquinas en paralelo.

Pocos de los algoritmos existentes se concibieron pensando en descomponerlos en fragmentos individuales, susceptibles de resolución por separado. Los algoritmos de ejecución en paralelo son algo enteramente nuevo y están, en gran medida, en construcción. Además, existe una relación simbiótica entre los algoritmos y las máquinas encargadas de ejecutarlos. Conforme los matemáticos van modelando los algoritmos los diseños de las máquinas varían. Lo resume David B. Salzman: "Un arquitecto diseña una máquina; un usuario implanta en ella un algoritmo; después, la siguiente generación de máquinas se perfecciona para mejor ejecutar el algoritmo. Se desarrollan algoritmos más rápidos, se vuelve a mejorar la máquina, y así sucesivamente."

Hillis y otros abogados del paralelismo aducen que muchos problemas son paralelos por naturaleza; lo que pasa es que no se han expresado así en el pasado. Charles Peskin, del Instituto Courant, se muestra de acuerdo. Peskin ha dedicado más de veinte años a la construcción de algoritmos que describan la dinámica de los latidos del corazón.

La construcción de modelizaciones del paso de la sangre a través de las válvulas cardíacas constituye una tarea computacionalmente agotadora. Durante el año pasado, Peskin convirtió su modelo bidimensional en un modelo tridimensional multicolor, valiéndose de un Cray 2 para efectuar los cálculos. E incluso así, la generación de un solo latido requiere más de un día de proceso en el Cray.

Aunque Peskin ha trabajado sobre todo con procesadores vectoriales, hace notar que su problema parece ser altamente paralelo, pues comporta la resolución de unos mismos sistemas de ecuaciones para muchas fibras cardíacas. Consiguientemente, contempla con optimismo la posibilidad de que una arquitectura paralela a gran escala le permita acelerar los cálculos y proporcionar mayor verismo a su modelización.

Aunque muchos problemas sean intrínsecamente paralelos, es inverosímil que exhiban el mismo grado de paralelismo. Por tanto, los informáticos han de prever el grado de paralelismo de los futuros problemas y proyectar después equipos capaces de ejecutar los algoritmos. Es preciso diseñar un sistema basado en un modelo de computación que sea tan general como el modelo uniprocesador y que permita a sus futuros usuarios programarlo rápidamente y bien.

Steve Nelson, director del equipo de Cray Research implicado en diseños de alto paralelismo, opina que el diseño de Cray va a requerir varios millares de procesadores en una malla o en una red "omega", que utiliza una serie intermedia de conmutadores entre los procesadores.

A la hora de construir sistemas comerciales, además de la velocidad y de la programación de sus máquinas, los diseñadores de superordenadores han de atender a una miríada de otros problemas. Por ejemplo, los superordenadores requieren una enorme capacidad de almacenamiento para poder manejar problemas grandes, amén de la capacidad de introducir rápidamente en la máquina y evacuar de ella vastos volúmenes de datos. Todos los superordenadores están "descompensados", se lamenta Michael P. Burwen, analista de superordenadores. Y los sistemas en paralelo suelen ser los peores "¿Sabe usted cuánto se tarda en cargar ocho gigaoctetos de memoria? Horas."

Aunque las arquitecturas en paralelo a gran escala ganen honores por su velocidad, ¿estarán dispuestos los investigadores a utilizar tales máquinas? "Tengo en vigor una apuesta con Hillis", revela Gordon Bell. La apuesta de Bell es que, en 1995, seguirán siendo superordenadores basados en procesadores vectoriales los encargados de los problemas.

En realidad, puede muy bien ocurrir que las arquitecturas en paralelo coexistan con las máquinas tradicionales. "El problema de realizar un sistema [de computación] óptimo no tiene una solución única", señala Nobuhiko Koike, director de investigación en NEC. "Existirán diferentes arquitecturas para diferentes sistemas. Si nos fijamos en los problemas computacionales que plantea la dinámica de fluidos, la máquina idónea puede ser de tipo vectorial con alto grado de paralelismo. Otras aplicaciones pueden precisar de redes neuronales u ordenadores en paralelo especialmente diseñados."

Y por ello, los vendedores de ordenadores pueden acabar ofreciendo conjuntos de material y programación concebidos especialmente para atacar problemas especializados, como la construcción de modelos para la ingeniería química. Es posible que los

Modelización en máquinas múltiples

Se está tornando realidad el sueño de conectar distintos ordenadores y formar con ellos una red sin costuras. Tan complejo tejido otorgará a los científicos la posibilidad de resolver parte de sus problemas en arquitecturas especializadas (estaciones de trabajo, procesadores especiales y superordenadores), mientras están en su oficina trabajando con ordenadores personales.

La clave para tales redes estriba tanto en los enlaces de alta velocidad entre componentes como en los equipos y la programación necesarias para gobernar la red. Aún son pocas las instituciones que gozan de enlaces a 100 megabits por segundo.

Veamos cómo podrían utilizar una red tres científicos *(flechas negras)* desde sus puestos de trabajo.

AMARILLO: Un especialista en física atmosférica está estudiando la rapidez con que una nube se convierte en una fuerte tormenta, bajo el efecto de una serie de condiciones de viento, temperatura y presión. Dado que la creación de un modelo tridimensional del fenómeno comporta sistemas de muchas ecuaciones no lineales en derivadas parciales, el científico confecciona en su estación de trabajo un programa que funcionaría en uno o varios procesadores de un superordenador vectorial.

El modelo exige que el superordenador consulte una gran base de datos almacenados en una "arca de datos" o "repartidor de archivos". Un enlace de alta velocidad entre el repartidor de archivos y el superordenador envía los datos en ambas direcciones.

ordenadores en paralelo no lleguen nunca a ser máquinas universales, aptas para cualquier tipo de problemas; el futuro quizás nos ofrezca más soluciones "envasadas en burbuja" junto con los sistemas tradicionales.

El movimiento en esta dirección puede verse facilitado por la evolución de redes de transmisión de datos a muy altas velocidades. En el pasado, los enlaces entre ordenadores eran demasiado lentos para consentir la división de tareas computacionales (aparte de las meras transferencias de ficheros). El año pasado (más o menos) ha visto grandes progresos en la formalización de normas e interfases, lo que permitirá a los usuarios de ordenadores bombear centenares de megaoctetos ("megabytes") por segundo a través de las redes.

Redes que darán a los investigadores la opción de descomponer en partes un mismo problema y asignar las distintas secciones a las arquitecturas más idóneas: superordenadores de distintas clases, procesadores altamente especializados, estaciones de trabajo, ordenadores personales, y así por demás. Los enlaces se extenderán más allá de un único emplazamiento.

También en el horizonte de mediados del decenio están las redes de potentes estaciones de trabajo, capaces de alcanzar rendimientos de gigaflops. Con tal de que los fragmentos de los problemas no exijan una comunicación demasiado frecuente, a muchos no les merecerá la pena recurrir a un Cray y les bastará con ser uno de los nodos de un gran ordenador distribuido.

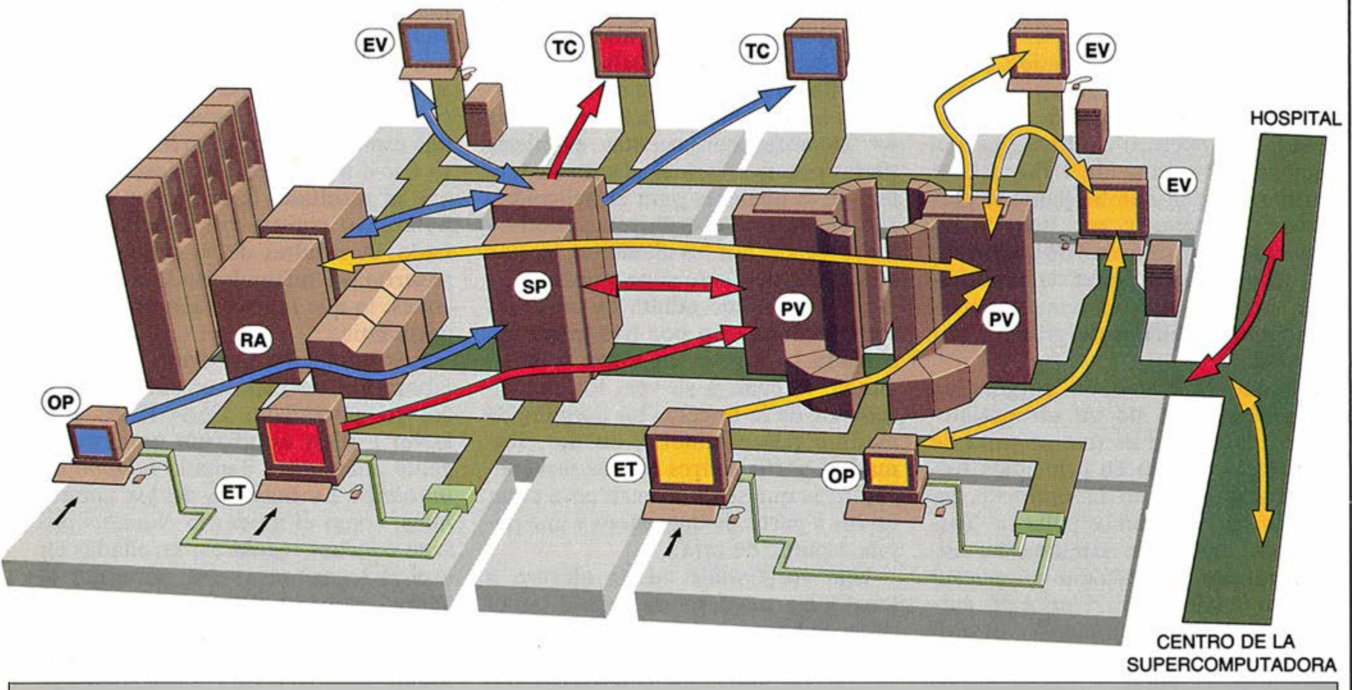
Los equipos de ordenadores acelerarán sin duda otra tendencia: los equipos de investigadores. Los inmensos problemas hoy abordados mediante supercomputadoras serán gestionados e interpretados por muchos colaboradores. Lo mismo que los hospitales disponen de equipos médicos especializados, en los que cirujanos y enfermeras trabajan organizadamente en una misma operación, puede que también así las grandes simulaciones informáticas exijan esfuerzos grupales.

De esta forma, el desplazamiento hacia nuevos paradigmas de computación está comenzando ya a modificar la naturaleza de la ciencia. "Cuando se eche la vista atrás, a las postrimerías del siglo XX", sugiere Hillis, "se dirá que los ordenadores fueron las cosas que afectaron en gran escala la vida de la gente, como antes pasó con el automóvil". Puede que no todos los resultados sean benéficos, concede, "pero sí fundamentales".

La información se descarga a una estación que transforma los datos numéricos en imágenes en perspectivas. El científico puede reclamar el modelo en tales estaciones de trabajo y examinar rebanadas de las imágenes en un ordenador personal. Puede explorar un subconjunto del problema con un procesador especializado, sito en un centro de supercomputación.

AZUL: Otro científico se apresta a animar el flujo de chorros de plasma astrofísico en tres dimensiones. Dado que ese trabajo comporta el cálculo de la interacción local de partículas en cierto volumen de espacio, descubre que resultaría más rápido efectuar los cálculos en una computadora de paralelismo a gran escala.

ROJO: Un investigador recibe de un hospital proyecciones planares de un cerebro, generadas por resonancia magnética nuclear. Un procesador vectorial le ayuda a construir un modelo tridimensional a partir de las secciones. Una computadora en paralelo efectúa, luego, la animación de los datos. Las imágenes se devuelven al hospital.



- OP ORDENADOR PERSONAL
- ET ESTACION DE TRABAJO
- RA REPARTIDOR DE ARCHIVOS
- SP SUPERCOMPUTADORA EN PARALELO A GRAN ESCALA
- PV SUPER-PROCESADOR VECTORIAL
- EV ESTACION DE VISUALIZACION
- TC TAMPON DE CUADRO
- 10 MEGABITS POR SEGUNDO
- 100 MEGABITS POR SEGUNDO
- 1000 MEGABITS POR SEGUNDO
- SIMULACION DE TORMENTA
- FLUJO DE PLASMA ASTROFISICO
- IMAGENES CLINICAS

Juegos de ordenador

Herramientas de grafismo informático nos hacen menos ajeno un mundo invisible

A. K. Dewdney

En el primer día del año terrestre 2991, el navío interestelar *Armstrong* se posó en el cuarto de los planetas que orbitan en torno a la estrella Tau Ceti. La tripulación del *Armstrong* detectó movimiento en la zona nordeste y enfocó la cámara de la nave sobre un acantilado rocoso distante. Allí, sobre un saliente, se encontraba un nido que, formado por cristal de roca, contenía un huevo similar a un buñuelo. El huevo empezó a disolverse; y de él eclosionó una criatura serpentiforme, compuesta por dos anillos concatenados. El biólogo de la misión se apresuró a bautizarla "gorgonoide". Al aproximarse la sonda para lograr una vista más detallada de la gorgonoide, la criatura, empavorecida, se puso rígida y saltó desde el acantilado a un río de acetileno.

El mundo de la gorgonoide pertenece a la ciencia-ficción, no cabe duda, pero su imagen reside en un ordenador del Centro de Investigación Thomas J. Watson, de IBM. El ser extraterrestre al que he llamado gorgonoide fue creado por uno de los magos del grafismo en IBM, Clifford A. Pickover, para poner de manifiesto la potencia de las nuevas herramientas de creación de gráficos por ordenador.

Aunque el huevo de gorgonoide tenga el aspecto de un ser extraterrestre, la verdad es que se trata de un modelo basado en principios físicos descubiertos en laboratorios terrestres. Si pudiéramos pelar la "cáscara" del huevo de gorgonoide, encontraríamos un armazón compuesto por dos "alambres". Uno está curvado hasta formar un círculo; el otro se arrolla en torno al círculo, en una espiral que se muerde la cola. Si los hilos estuvieran cargados a cierta diferencia de potencial, se engendraría una fuerza eléctrica que sería más intensa en los puntos cercanos al armazón de alambre que en los puntos alejados. El programa de Pickover halla todos los puntos donde la fuerza tendría la misma intensidad, y después los representa gráficamente, formando así el huevo de gorgonoide. Pickover llama "esculpido eléctrico" a su técnica.

Pickover practica el arte del esculpido eléctrico para mostrar gráficamente toda una variedad de estructuras atómicas, que van desde moléculas simples hasta la complicada espiral del ADN. Dado que la escultura por diferencia de potencial exhibe las fuerzas eléctricas que rodean a las moléculas, los investigadores podrán tal vez deducir la forma en que esas mismas moléculas, cuando se producen en células vivas, se acoplen a ciertos lugares de recepción de otras células.

La gorgonoide joven no constituye una escultura de voltaje, sino lo que podríamos llamar un collar sin fin. Al igual que el huevo, la gorgonoide se basa en dos bucles de alambre, uno de los cuales se arrolla helicoidalmente en torno al otro. Para crear el cuerpo de la gorgonoide, Pickover adorna los alambres con cuentas esféricas: perlas grandes para el alambre circular, otras menores para el helicoidal. Las cuentas se distribuyen a intervalos regulares por los alambres; las que son consecutivas se superponen.

La gorgonoide adulta es un collar sin fin compuesto por tres guías. La primera se arrolla en torno a la segunda, la cual, a su vez, lo hace alrededor de la tercera. La gorgonoide madura posee también un ojo, formado a partir de tres esferas casi concéntricas que se intersecan para crear un iris a partir de una esfera y una pupila a partir de otra.

Una gorgonoide adulta alcanza a localizar a sus depredadores a través de la neblina amónica, hasta distancias de más de un kilómetro y medio, lo cual contribuye señaladamente a su supervivencia cuando se ve acechada por una pacmantis. La pacmantis, una criatura en forma de copa, se pasa media vida dejándose bañar por los tibios rayos de Tau Ceti. Pero cuando se le abre el apetito, se echa a rodar por el suelo, abriendo y cerrando su bocaza como el "Pac-Man" de los videojuegos.

La anatomía de la pacmantis no es más complicada que la morfología de la gorgonoide. Para insuflar vida a la pacmantis, Pickover crea un péndulo computarizado. A tal fin, simula el movimiento de una bola atada al extremo de un alambre rígido; el otro extremo está conectado a un pivote que permite al sistema alambre-bola oscilar con libertad en todas las direcciones.

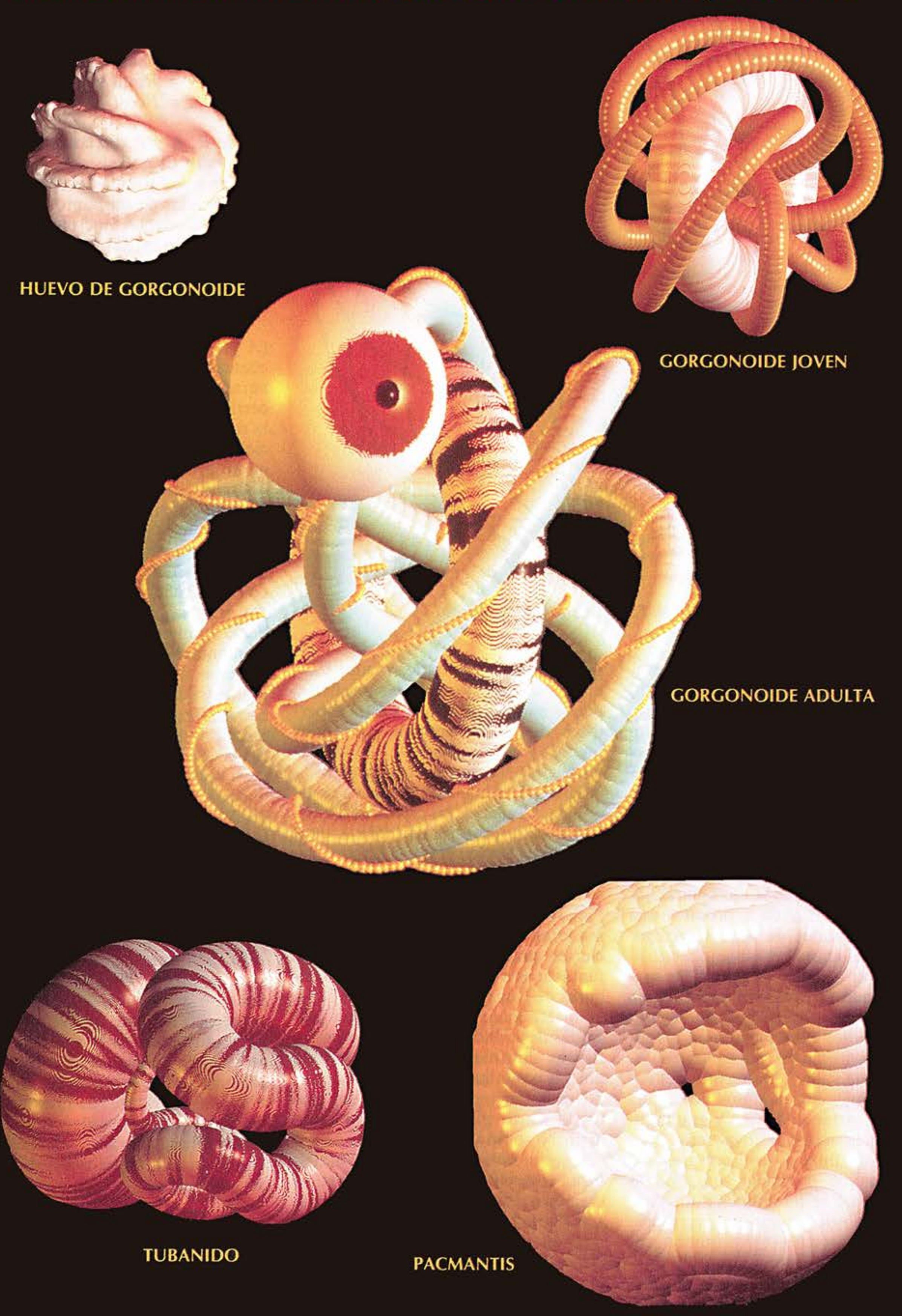
El péndulo se impulsa inicialmente hacia un lado, con una cierta velocidad, y se pone a oscilar seguidamente, por efecto de la gravedad. Después de haber oscilado hacia atrás y hacia adelante, llega a un punto que se encuentra a determinada distancia del de partida. En el curso de sus posteriores oscilaciones, la bola cubre casi todo el espacio disponible en la esfera de posiciones alcanzables.

Mientras el péndulo está en oscilación, el ordenador de Pickover va tomando periódicamente instantáneas de la bola. Al mostrar a la vez muchos de estos fotogramas, se forma una especie de concha o caparazón. Haciéndola girar 90 grados, resulta visible el exoesqueleto de una pacmantis en su debida orientación.

Aunque la pacmantis se zampe de vez en cuando alguna gorgonoide, su cena favorita son los tubánidos que moran en los océanos amoniacales. Estos suculentos mariscos nos recuerdan a ciertos ammonites que florecieron en la Tierra allá por el Mesozoico. Posee el tubánido una vistosa concha jaspeada, que comienza siendo una espiral abierta, pero luego se curva hacia atrás sobre sí misma, con lo que el resultado hace pensar en una tuba cuyo constructor estuviera chiflado. A resultas de su retorcido caparazón, el tubánido nada a trompicones, lo que le hace fácil presa de la pacmantis.

Los tubánidos son fruto de la colaboración de Pickover con el malacólogo australiano Chris Illert. Pickover e Illert estudiaron un extravagante ammonites llamado *Nipponites mirabilis*. La mayoría de los ammonites, como el moderno *Nautilus* poseen conchas regulares, arrolladas en espiral logarítmica, que permiten al animal moverse suavemente a través del agua. Durante las primeras fases del crecimiento, la concha de *N. mirabilis* crece de forma muy similar a la de los otros ammonites, pero más tarde se enrosca y retuerce en todas las direcciones. Illert esperaba investigar tan insólitas pautas de crecimiento tratando de hallar una descripción matemática de la espiral irregular.

Y dio con una fórmula que posee interpretación sencilla. Lo que determina la dirección de crecimiento de la


CRIATURAS INFORMATICAS PROCEDENTES DE UN MUNDO JAMAS VISTO
HUEVO DE GORGONOIDE
GORGONOIDE JOVEN
GORGONOIDE ADULTA
TUBANIDO
PACMANTIS

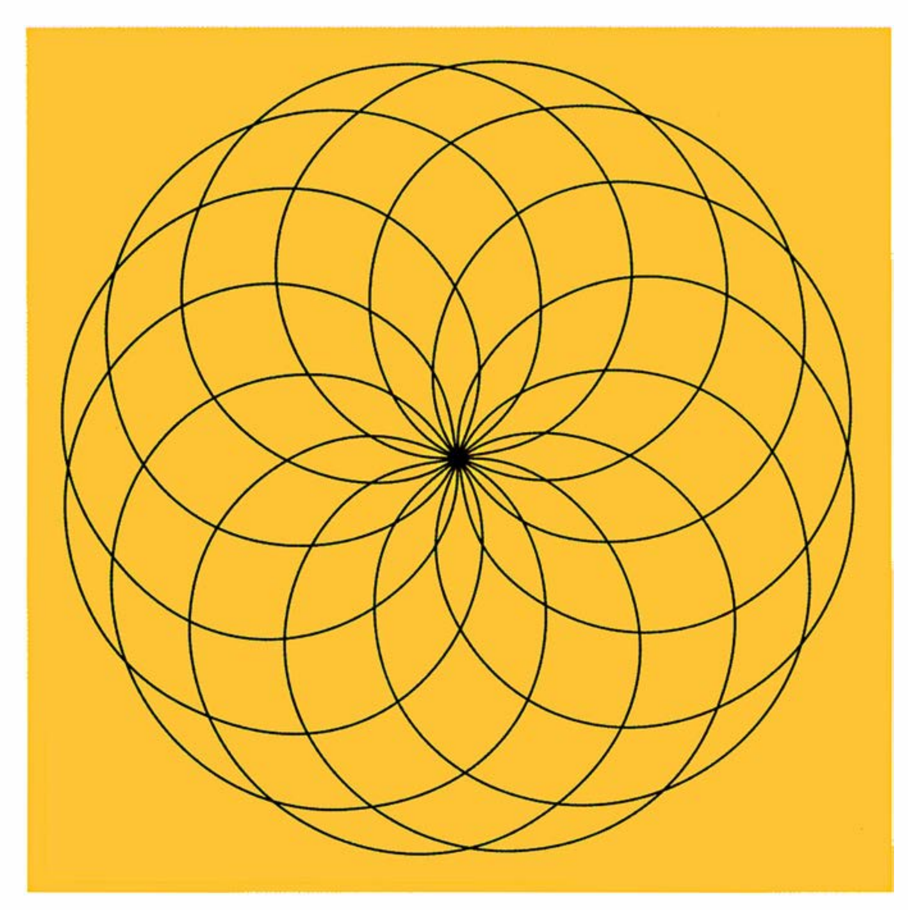


Figura de Lissajous esférica.

concha es la orientación de su apertura. En un crecimiento espiral ordinario, la orientación de la apertura permanece fija con respecto a los anillos adyacentes de la concha. Pero el crecimiento de *N. mirabilis* admite una elegante modelización si se hace girar la apertura de la concha según una ley exponencial: al crecer la concha, su abertura gira más y más. Tal hipótesis genera la forma de ammonites correcta para los ejemplares jóvenes de *N. mirabilis* y produce una espiral retorcida, de aspecto irregular, para el animal más viejo.

Pickover e Illert pusieron de manifiesto que el tubánido proporciona una modelización idónea de *N. mirabilis* adulto. Para lograr que los tubánidos morasen en tres dimensiones, Pickover se valió de la técnica del collar sin fin, coloreándolos por alternancia de esferas blancas y granates.

Aunque las ideas subyacentes a los collares sin fin y a las esculturas por diferencia de potencial son todo lo sencillas que se ha anunciado, siento la tentación de repetir la advertencia del artista circense: "¡No quiera imitarlo en casa!" Después de todo, Pickover tiene acceso a ordenadores específicamente diseñados para creación de gráficos. Su sistema de cómputo puede automáticamente sombrear, matizar y ocultar superficies; puede mostrar el reflejo en las superficies de la luz emitida por varias fuentes y puede producir, en un instante, una visión de un objeto tridimensional desde el ángulo que se quiera. La piel de las criaturas de Pickover se encuentra tan sólo a unas cuantas pulsaciones de teclas.

Aunque los ordenadores domésticos no disponen de tales facilidades, Pickover no desanimaría a los programadores aficionados para que creasen ciertos gráficos tan exquisitos cuan fantásticos a los que se conoce por figuras de Lissajous esféricas. En 1857, el matemático francés Antoine Lissajous describió por vez primera estas figuras sinusoidales que hoy desfilan por las pantallas de los osciloscopios. Al moverse un punto brillante, que oscila cierto número de veces hacia arriba y abajo y cierto número de veces de un lado a otro de la pantalla, hasta retornar al punto de partida, se crea una figura de Lissajous plana. Las figuras de Lissajous esféricas poseen las mismas propiedades que sus parientes bidimensionales, salvo que, en vez de yacer sobre un plano, están contenidas en la superficie de una esfera. Para representar en tres dimensiones esta curva tridimensional, se requiere un sistema de tres ecuaciones, cada una de las cuales depende de una única variable t, que podemos imaginar que es el tiempo.

$$x = R\mathrm{sen}(At)\cos(Bt)$$
$$y = R\mathrm{sen}(At)\mathrm{sen}(Bt)$$
$$z = R\cos(At)$$

donde R, A y B son constantes. Para cada valor de t, el sistema constituido por las tres fórmulas proporciona las coordenadas de un punto del espacio tridimensional. Al incrementar el valor de t (esto es, al transcurrir el tiempo), la fórmula produce una sucesión de puntos que generan la curva de Lissajous esférica.

Ajustando los valores de R, A y B (A y B son proporcionales a las frecuencias de oscilación) se pueden generar figuras fascinantes. La curva se cerrará sobre sí misma, a menos que la razón de A a B sea un número irracional, acontecimiento poco verosímil en un ordenador.

Los lectores pueden preparar un sencillo programa de ordenador que les permita visualizar una curva de Lissajous esférica sobre una pantalla bidimensional. El programa ha de empezar solicitando los valores de R, A y B, y, seguidamente, entrar en un bucle en el cual el valor de t se va incrementando de 1 a 1000, pongamos por caso. Para cada valor de t, el programa ha de calcular x e y de acuerdo con las fórmulas. La abscisa, x, se obtendrá multiplicando R por el seno de A veces t, y este valor, por el coseno de B veces t. Finalmente, el programa debería dibujar en alguna clase de perspectiva el punto. Lo más sencillo (aunque no lo más interesante) consiste en representar la proyección del punto sobre el plano definido por los ejes x e y, lo que a fin de cuentas equivale a representar en la pantalla las coordenadas (x,y).

El algoritmo recién descrito tiene algunas pegas. Para empezar, seguramente será preciso modificar los números x e y para que el punto a dibujar aparezca en la pantalla. Si es necesario, súmenseles constantes adecuadas. En segundo lugar, es posible que los valores de t hayan de variar más gradualmente, si se desea producir una curva de aspecto continuo y no una mera ristra de puntos muy separados.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

COMPUTERS, PATTERN, CHAOS, AND BEAUTY. Clifford A. Pickover. St. Martin's Press, 1990.

Juegos matemáticos

Los números multiperfectos vistos a través del error de Fermat y la sagacidad de Descartes

Ian Stewart

El lector conoce sin duda la broma en que nos ofrecen un millón de pesetas por estar cinco minutos seguidos sin pensar en la palabra "hipopótamo". Y claro, cuanto más nos concentramos más difícil resulta no pensar en ella. En tal situación me encontraba yo, sólo que la palabreja no era hipopótamo, sino Descartes. Recuérdense mis desventuras con Leonhard Euler en la corte de Catalina la Grande [*Investigacion y Ciencia*, enero de 1991] y la búsqueda de los números perfectos impares. En aquella ocasión pretendía yo encaminarme al lejano planeta Ombilicus, pero mi travesía por el espacio-tiempo estaba determinada por el pensamiento. En mis esfuerzos por sustraerme de la zona que Euler define en el continuo espacio-temporal me había adentrado inadvertidamente en la de Descartes. Y estaba, al parecer, atrapado en ella.

No podía quitarme de la cabeza la noción de número multiperfecto. Y Descartes había sido el primero en abrir esta investigación.

Se dice que un entero N es *multiperfecto* cuando es divisor de $\sigma(N)$, siendo $\sigma(N)$ la suma de los divisores de N (comprendido él mismo). Su multiplicidad es, por definición, el cociente $\sigma(N)/N$. Los números perfectos ordinarios son los de multiplicidad 2; los triperfectos, de multiplicidad 3, y así sucesivamente. El menor de los números triperfectos es $N = 120$, hecho que ya conocía Robert Recorde en 1557. En efecto: la suma de sus divisores es

$$\sigma(120) = 1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6 + 8 + 10 + 12 + 15 + 20 + 24 + 30 + 40 + 60 + 120 = 360 = 3 \times 120.$$

Los números multiperfectos no fueron verdaderamente estudiados sino a partir del siglo XVII, por diversos matemáticos franceses. En la nomenclatura de aquéllos, los números triperfectos se denominaban subdobles, los tetraperfectos, subtriples, y así sucesivamente. Esta terminología, aún utilizada en la "Teoría de números" de Lucas, a finales del siglo XIX, reflejaba la tendencia de la época a omitir al propio número N de la lista de divisores de N. Diremos aquí que N es un divisor impropio de sí mismo; todos sus demás divisores son *propios*.

Atascado como estaba en la época de Descartes, me propuse sacar partido de mi estancia: "¿A qué se debe vuestro interés por la investigación de los números multiperfectos?", le pregunté.

—¡Ah! —respondió— la culpa la tiene el fraile ése, Marin Mersenne. A comienzos del invierno de 1631 me escribió una carta, proponiéndome encontrar un número subdoble (triperfecto, en nuestra terminología) distinto del 120.

—¡Y vos hallásteis alguno!

—En efecto, ¡pero tardé siete años! Y entre tanto, Mersenne le había planteado la misma cuestión a otros y había creado la noción de número multiperfecto. Pierre de Fermat consiguió una solución antes que yo: en 1636 acertó con el segundo número triperfecto: $672 = 2^5 \times 3 \times 7$.

—¿Y cómo lo obtuvo? ¿Por tanteo?

—Tengo una cierta idea sobre la cuestión, dijo Descartes, con aire de superioridad. Fermat declaró haberlo encontrado por un método general que describió como sigue: se parte de la progresión geométrica 2, 4, 8,... En la línea superior se le resta 1 a cada término y en la inferior se le suma 1.

—¿De esta forma:

1 3 7 15 31 63 127
2 4 8 16 32 64 128
3 5 9 17 33 65 129?,

pregunté yo.

—Exactamente. El método dice que si al dividir el $(n + 3)$-ésimo número de la línea superior por el n-ésimo número de la inferior resulta un cociente primo (y distinto de 2 y de 3), entonces el triple de este número primo, multiplicado por el $(n + 2)$-ésimo número de la línea central, es triperfecto.

—Vayamos despacio. A ver si lo he entendido... El n-ésimo número de la hilera central es 2^n; por tanto, el n-ésimo de la línea superior es $2^n - 1$, y el n-ésimo de la hilera inferior es $2^n + 1$. Así pues, Fermat afirma que si $p = (2^{n+3} - 1)/(2^n + 1)$ es número primo, entonces $3 \times 2^{n+2} \times p$ es un número triperfecto.

"Me parece que debemos aplicar dos cosas. En primer lugar tenemos la multiplicatividad de la función 'suma de divisores', o sea, que $\sigma(MN) = \sigma(M)\sigma(N)$ cuando M y N sean primos entre sí. Y enseguida, que, si p es primo, entonces $\sigma(p^n) = 1 + p + p^2 + \ldots + p^n = (p^{n+1})/(p - 1)$ [*consúltense los detalles en el artículo precitado*]. Por tanto:

$$\sigma(3 \times 2^{n+2} \times p) = \sigma(3)\,\sigma(2^{n+2})\,\sigma(p) = 4(2^{n+3} - 1)(1 + p).$$

Ahora bien,

$$p = (2^{n+3} - 1)/(2^n + 1)$$

y por consiguiente,

$$1 + p = (2^{n+3} + 2^n)/(2^n + 1),$$

lo que nos lleva a:

$$4(2^{n+3} - 1)(2^{n+3} + 2^n)/(2^n + 1)$$

o sea:

$$4 \times 2^n(2^3 + 1)(2^{n+3} - 1)/(2^n + 1) = 9 \times 2^{n+2} p$$

es decir,

¡3 veces $3 \times 2^{n+2} p$

como afirmaba Fermat! ¡Fantástico! Pero, ¿cómo pudo descubrirlo?

—Lo mismo que tantas otras ideas de Fermat, eso quedará en el misterio. Sea como fuere, para $n = 3$ se tie-

ne que 63/9 = 7 es primo, y por tanto, $2^5 \times 3 \times 7$ es triperfecto."

¿Proporciona este método de Fermat la totalidad de los números triperfectos?

—De ninguna manera. Tengo a este respecto una anécdota que referiros. En abril de 1638, André Jumeau, prior de Sainte Croix, me comunicaba el tercer número triperfecto, retándome a mí a hallar el cuarto. El tercer número triperfecto es $523\,776 = 2^9 \times 3 \times 11 \times 31$, que a todas luces no se obtiene por la regla de Fermat, pues 11×31 no es primo. A decir verdad, me percaté de que este método de Fermat no proporciona más que los dos primeros números triperfectos. Me hice la pregunta, ¿para qué valores de n resulta ser $2^n + 1$ un divisor de $2^{n+3} - 1$? Y obtuve que el cociente de estos dos números era apenas algo inferior a $2^{n+3}/2^n$, cuyo valor es 8. Calculé seguidamente los valores de $(2^{n+3} - 1)/(2^n + 1)$ para los primeros valores de n y observé que, para n mayor o igual que 4, este cociente estaba comprendido entre 7 y 8, y que por tanto no podría ser entero."

¿Sabría el lector demostrar lo que Descartes afirma?

"Incluso el gran Fermat tiene despistes de cuando en cuando, concluyó Descartes. A mí me parece que descubrió su solución por tanteos y que después la acomodó a su pretendido método. Sírvaos de lección, viajero del tiempo: consagrarse a demostrar teoremas cuyas hipótesis no se verifican en casos útiles no es sino pérdida de tiempo y de energía."

Yo adopté un aire contrito. "¿Habéis descubierto vos el cuarto número triperfecto?", inquirí.

"¡Desde luego, señor! ¡No fue cosa baladí, os lo aseguro! Porque es muchísimo más grande que los anteriores:

$$1\,476\,304\,896 = \\ = 2^{13} \times 3 \times 11 \times 43 \times 127.$$

—¡Grandioso!

—Y eso no fue más que un comienzo. Al poco descubrí seis números tetraperfectos y un número pentaperfecto! [*Véase la tabla A*]. Me convencí de poder hallar un número heptaperfecto, enormemente grande, sin duda, de haber sido necesario.

—¿Y qué pensó Fermat de todo esto?

—¡El muy patán se atribuyó por las buenas el descubrimiento del cuarto número triperfecto! Pretendía poseer un método general y así lo expresó con vehemencia, mas sin demostración alguna. En el ínterin, yo revelé algunos de mis resultados."

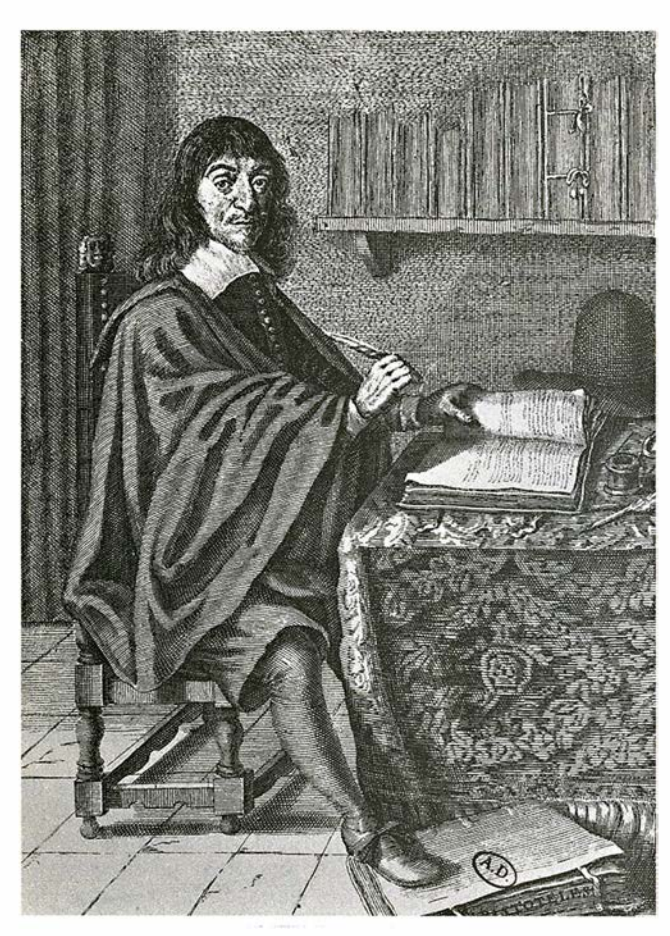
Hizo una lista de ellos. Los más sencillos eran:

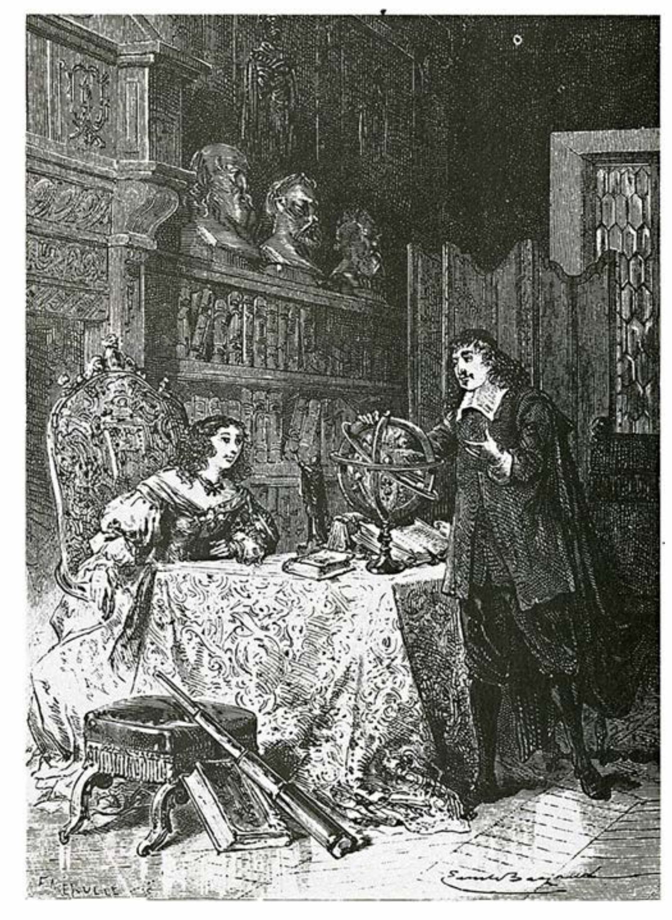
—Si N es triperfecto y no divisible por 3, entonces $3N$ es tetraperfecto.

—Si N es triperfecto y divisible por 3, pero no por 5 o por 9, entonces $45N$ es tetraperfecto.

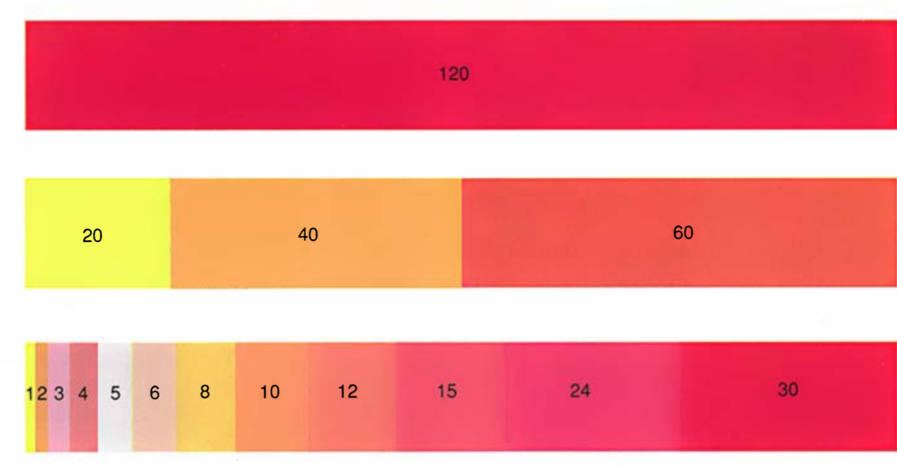
—Si N es triperfecto y divisible por 3, pero no por 7, 9 o 13, entonces $3 \times 7 \times 13N$ es tetraperfecto. *¿Podrá el lector demostrar estos resultados de Descartes sacando partido de la multiplicatividad de* σ?

Descartes me hizo partícipe de muchos de sus secretos; yo, a mi vez, le informé de los resultados más recientes sobre números multiperfectos. Por otra parte, las cuestiones teóricas aún no resueltas son de una dificultad superlativa. No se sabe, por ejempo, si existen números triperfectos impares, pero se ha demostrado que, si





1. René Descartes (1596-1650), soldado, matemático, filósofo y profesor de la reina Cristina de Suecia.



2. Demostración gráfica de que 120 es triperfecto. Sus divisores forman tres grupos, que suman cada uno 120. ¿Podemos esperar una agrupación como ésta para todo número triperfecto?

hay alguno, ha de tener no menos de 51 cifras.

El aficionado a las matemáticas recreativas tiene vedado el acceso a la investigación de los *números amigos*, estrechamente emparentados con los anteriores. En lugar de hablar de problemas pendientes, prefiero exponer un descubrimiento reciente e interesante, que resuelve un problema antiguo. Según Génesis (XXXII-14), Jacob le hace un obsequio a su hermano Esaú: 200 cabras, 20 machos cabríos, 200 ovejas y 20 carneros. ¿A qué estos números? Se cuenta que Rau Nachson, en el siglo IX después de Cristo, lo había explicado así: "Nuestro padre Jacob había preparado con gran sabiduría su regalo. Este número 220 (de cabras más corderos) oculta un secreto, es uno de los miembros de una pareja de números tales que la suma de las partes (alícuotas) de uno es igual al otro, que es 284, y recíprocamente. Y Jacob lo tuvo muy presente; pues este secreto había sido practicado por los antiguos para ganarse el favor de reyes y dignatarios."

Los números 220 y 284 constituyen un *par amigable*: cada uno de ellos es la suma de los divisores propios del otro. Durante miles de años se sostuvo que tales números tenían significado esotérico. En términos de la función σ podemos decir que (M, N) es un par amigable si $M = \sigma(N) - N$ y $N = \sigma(M) - M$. (Los sustraendos sirven para eliminar los divisores impropios, N de N y M de M.) De forma equivalente, podemos decir que los números M y N son amigos si y sólo si $\sigma(M) = \sigma(N) = M + N$.

Se conocen en la actualidad millares de pares de números amigos; los menores que 10.000 son (220, 284), (1184, 1210), (2620, 2924), (5020, 5564) y (6323, 6368). El propio Descartes descubrió el par de amigos (9 363 584, 9 437 056), que era a la sazón el tercero de los pares descubiertos. La mayoría de los pares de amigos constan de números pares, pero (a diferencia de los números perfectos) se sabe que puede haber pares de amigos donde ambos son nones. Los primeros ejemplos fueron descubiertos por Euler, entre los que figuran (69 615, 87 633). Hasta hace muy poco, se ignoraba si habría parejas de amigos nones (M, N), en las que M y N no fueran divisibles por 3. Más todavía, Paul Bratley y John McKzay conjeturaron en 1968 la inexistencia de tales pares. Sin embargo, en 1988, S. Battaito y W. Boho construyeron 15 de tales parejas. Mencionaré tan sólo la más pequeña, que es:

$$(5^4 \times 7^3 \times 11^3 \times 13^2 \times 17^2 \times \\ \times 19 \times 61^2 \times 97 \times 307 \times 140\,453 \times \\ \times 85\,857\,199, \\ 5^4 \times 7^3 \times 11^3 \times 13^2 \times \\ \times 17^2 \times 19 \times 61^2 \times 97 \times 307 \times \\ \times 56\,099 \times 214\,955\,207),$$

o en notación decimal:

(353 804 384 422 460 183 965 044 607 821 130 625,
353 808 169 683 168 273 495 496 273 894 069 375).

La pareja mayor que han descubierto consta de números de 73 cifras.

En este punto se me ocurrió que existe una generalización de la función σ que abre campos de indagación completamente nuevos y que sí es accesible al matemático aficionado. "René, acaba de ocurrírseme una idea. ¡Los números *potencial-perfectos*! (Bueno, he de admitir que la idea no es verdaderamente mía, pues fue propuesta por Leonard Eugene Dickson en 1919. Pero no tengo noticia de que se haya efectuado un estudio sistemático. Además, yo se lo estaba sugiriendo a Descartes en 1639, mucho antes de Dickson. ¡Quién sabe si Dickson no me robó la idea!)

—¿Qué quieres decir?, preguntó Descartes.

—Denotemos $\sigma_2(N)$ a la suma de los cuadrados de los divisores de N (N incluido), $\sigma_3(N)$ a la suma de los cubos de los divisores; y, en general, $\sigma_k(N)$ a la suma de las k-ésimas potencias de los divisores de N. Digamos, por definición, que N es *k-potencial-perfecto* en el caso de que N

3. El Padre Marin Mersenne (segundo del grupo central), *corresponsal infatigable de los principales matemáticos de su época, nacido en 1588, fallecido en 1648. En este cuadro de Chartran, Mersenne discute de experiencias sobre el peso con René Descartes, Blaise Pascal y Girard Desargues.*

divida exactamente a $\sigma_k(N)$. Y lo mismo que antes, sea su multiplicidad el cociente $\sigma_k(N)/N$.

"¿Y existen tales números?", inquirió.

"¡Averigüémoslo!", propuse.

Nos sentamos y efectuamos algunos cálculos, para $k = 2$, 3 y $N \leqslant 2000$. Existen efectivamente números cuadrado-perfectos y cubo-perfectos; los resultados que obtuvimos están resumidos en las tablas B y C.

Dichas tablas suscitan bastantes más preguntas de las que responden. Todos los números cuadrado-perfectos de las tablas, exceptuados el 1 y el 64, son múltiplos de 5; la mayoría son múltiplos de 10. ¿A qué se debe? ¿Continúa la pauta? 150 y 175 son *gemelos* cuadrado-perfectos, pues tienen la misma σ_2. ¿Existen otros casos? Desde luego, parece fácil que dos enteros distintos M y N tengan $\sigma_2(M) = \sigma_2(N)$; los primeros ejemplos son (6,7), (24, 26), (30, 35), (40, 47); más adelante vienen (834,973), que poseen ambos $\sigma_2 = 966\,100$. ¿Existirá una infinidad de tales pares? ¿Existirán ternas? ¿Qué se puede decir de las correspondientes cuestiones para σ_3? ¿Existen números k-potencial-perfectos para $k \geqslant 4$?

Al investigar estas cuestiones y otras similares podrá resultarnos útil saber que las funciones σ_k, lo mismo que σ, son multiplicativas. Es decir, $\sigma_k(MN) = \sigma_k(M)\sigma_k(N)$ siempre que M y N sean primos entre sí.

"¿Habéis observado", señaló Descartes, "que $\sigma_2(N)$ puede a veces, aunque raramente, ser un cuadrado? Los únicos ejemplos que he descubierto son

$$\sigma_2(1) = 1^2,\ \sigma_2(42) = 50^2,$$
$$\sigma_2(287) = 290^2,\ \sigma_2(728) = 850^2.$$

Me pregunto si habrá otros.

Estuvimos dándole vueltas al problema durante algún tiempo, y al cabo atinamos con un método para construir muchísimos números N tales que $\sigma_2(N)$ fuera un cuadrado. El lector podrá seguramente generalizarlo más, y modificarlo quizás para buscar casos en los que $\sigma_2(N)$ sea un cubo, o en los que $\sigma_3(N)$ sea un cuadrado o un cubo.

He aquí la idea. Comencemos por decir que un número *carece de cuadrados* si no tiene divisores cuadrados mayores que 1. O lo que es igual, tiene que ser producto de números primos *distintos*. Todo número n puede ser unívocamente expresado en la forma $n = r^2 s$, donde s carece de cuadrados; el número s es la *parte sin cuadrados* de n. Para ver por qué,

A: ALGUNOS NUMEROS MULTIPERFECTOS

NUMEROS	DESCUBRIDOR	FECHA
TRIPERFECTOS		
$2^3 \times 3 \times 5$	Recorde	1557
$2^5 \times 3 \times 7$	Fermat	1636
$2^9 \times 3 \times 11 \times 31$	Jumeau	1638
$2^{13} \times 3 \times 11 \times 43 \times 127$	Descartes	1638
$2^8 \times 5 \times 7 \times 19 \times 37 \times 73$	Mersenne	1638
$2^{143} \times 5 \times 7 \times 19 \times 31 \times 151$	Fermat	1643
TETRAPERFECTOS		
$2^5 \times 3^3 \times 5 \times 7$	Descartes	1638
$2^3 \times 3^2 \times 5 \times 7 \times 13$	Descartes	1638
$2^9 \times 3^3 \times 5 \times 11 \times 31$	Descartes	1638
$2^9 \times 3^2 \times 7 \times 11 \times 13 \times 31$	Descartes	1638
$2^{13} \times 3^3 \times 5 \times 11 \times 43 \times 127$	Descartes	1638
$2^8 \times 3 \times 5 \times 7 \times 19 \times 37 \times 73$	Lucas	1891
$2^7 \times 3^2 \times 5^2 \times 17 \times 31$	Mersenne	1639
$2^{10} \times 3^3 \times 5^2 \times 23 \times 31 \times 89$	Mersenne	1639
$2^{14} \times 3 \times 5 \times 7 \times 19 \times 31 \times 151$	Fermat	1643
$2^7 \times 3^6 \times 5 \times 17 \times 23 \times 137 \times 547 \times 1093$	Fermat	1643
$2^2 \times 3^2 \times 5 \times 7^2 \times 13 \times 19$	Lehmer	1900
$2^8 \times 3^2 \times 7^2 \times 13 \times 19^2 \times 37 \times 73 \times 127$	Lehmer	1900
$2^{14} \times 3^2 \times 7^2 \times 13 \times 19^2 \times 31 \times 127 \times 151$	Carmichael	1910
$2^{25} \times 3^3 \times 5^2 \times 19 \times 31 \times 683 \times 2731 \times 8191$	Carmichael	1910
$2^{25} \times 3^6 \times 5 \times 19 \times 23 \times 137 \times 547 \times 683 \times 1093 \times 2731 \times 8191$	Carmichael	1910
PENTAPERFECTOS		
$2^7 \times 3^4 \times 5 \times 7 \times 11^2 \times 17 \times 19$	Descartes	1638
$2^{10} \times 3^5 \times 5 \times 7^2 \times 13 \times 19 \times 23 \times 89$	Frenicle	1638
$2^7 \times 3^5 \times 5 \times 7^2 \times 13 \times 17 \times 19$	Descartes	1639
$2^{11} \times 3^3 \times 5^2 \times 7^2 \times 13 \times 19 \times 31$	Lehmer	1900
$2^{20} \times 3^3 \times 5 \times 7^2 \times 13^2 \times 19 \times 31 \times 61 \times 127 \times 337$	Fermat	1643
$2^{17} \times 3^5 \times 5 \times 7^3 \times 13 \times 19^2 \times 37 \times 73 \times 127$	Fermat	1643
$2^{10} \times 3^4 \times 5 \times 7 \times 11^2 \times 19 \times 23 \times 89$???	Carmichael	1906
$2^{21} \times 3^6 \times 5^2 \times 7 \times 19 \times 23^2 \times 31 \times 79 \times 89 \times 137 \times 547 \times 683 \times 1093$	Lehmer	1900
HEXAPERFECTOS		
$2^{23} \times 3^7 \times 5^3 \times 7^4 \times 11^3 \times 17^2 \times 31 \times 41 \times 61 \times 241 \times 307 \times 467 \times 2801$	Fermat	1643
$2^{27} \times 3^5 \times 5^3 \times 7 \times 11 \times 13^2 \times 19 \times 29 \times 31 \times 41 \times 43 \times 61 \times 113 \times 127$	Fermat	1643
$2^{36} \times 3^8 \times 5^5 \times 7^7 \times 11 \times 13^2 \times 19 \times 31^2 \times 43 \times 61 \times 83 \times 223 \times 331 \times 379 \times 601 \times 757 \times 1201 \times 7019 \times 112\,303 \times 898\,423 \times 616\,318\,177$	Mersenne et Fermat	1643
$2^{19} \times 3^6 \times 5^3 \times 7^2 \times 11 \times 13 \times 19 \times 23 \times 31 \times 41 \times 137 \times 547 \times 1093$	Lehmer	1900
$2^{24} \times 3^8 \times 5 \times 7^2 \times 11 \times 13 \times 17 \times 19^2 \times 31 \times 43 \times 35 \times 127 \times 379 \times 601 \times 757 \times 1801$	Lehmer	1900
$2^{61}(2^{62} - 1)3^7 \times 5^4 \times 7^2 \times 11 \times 13 \times 19^2 \times 23 \times 59 \times 71 \times 79 \times 127 \times 157 \times 379 \times 757 \times 43\,331 \times 3\,033\,169$	Cunningham	1902
$2^{15} \times 3^5 \times 5^2 \times 7^2 \times 11 \times 13 \times 17 \times 19 \times 31 \times 43 \times 257$	Carmichael	1906
HEPTAPERFECTOS		
$2^{46}(2^{47} - 1) \times 19^2 \times 127 \times C$	Cunningham	1902
$2^{46}(2^{47} - 1) \times 19^4 \times 151\,911 \times C$	Cunningham	1902
où : $C = 3^{15} \times 5^3 \times 7^5 \times 11 \times 13 \times 17 \times 23 \times 31 \times 37 \times 41 \times 43 \times 61 \times 89 \times 97 \times 193 \times 442\,151$		

B: NUMEROS CUADRADO-PERFECTOS MENORES QUE 2000

N	$\sigma_2(N)$	$\sigma_2(N)/N$
1	1	1
10	130	13
60	5460	91
65	4420	68
84	10 500	125
130	22 100	170
140	27 300	195
150	32 550	217
175	32 550	186
260	92 820	357
350	162 750	465
420	273 000	650
525	325 500	620
780	928 200	1190
1050	1 627 500	1550
1105	1 281 800	1160
1820	4 641 000	2550

C: NUMEROS CUBO-PERFECTOS MENORES QUE 2000

N	$\sigma_3(N)$	$\sigma_3(N)/N$
1	1	1
6	252	42
42	86 688	2064
120	2 063 880	17 199
168	5 634 720	33 540
270	23 178 960	85 848
280	25 356 240	90 558
312	36 003 240	115 395
496	139 456 352	281 162
672	360 708 768	536 769
728	442 325 520	607 590
840	709 974 720	845 208
1080	1 506 632 400	1 395 030
1560	4 536 408 240	2 907 954
1782	6 615 949 428	3 712 654
1806	6 892 389 504	3 816 384
1890	7 973 562 240	4 218 816

D: TABLA AUXILIAR PARA CONSTRUIR LOS σ_2 CUADRADOS

p	Divisores primos de la parte sin cuadrados de $\sigma_2(p)$							
	2	5	13	17	29	37	41	53
2	■							
3	■	■						
5	■	■						
7	■							
13	■	■		■				
17	■	■			■			
23	■	■						■
31	■		■			■		
41	■							
43	■					■		
47	■	■	■	■				
73	■	■	■				■	
83	■	■	■					■
157	■			■	■			
191	■			■	■	■		
307	■	■	■		■			
401	■					■	■	■

descompongamos n en factores primos. Estos serán del tipo p^{2k}, con exponente par, o del tipo p^{2k+1}, con exponente impar. Escribamos

$$p^{2k} = (p^k)^2 \text{ y } p^{2k+1} = (p^k)^2 p.$$

Cada $(p^k)^2$ aporta un factor p^k a r; pero el p supernumerario del segundo caso aporta un factor p a s. Así:

$$360 = 2^3 \times 3^2 \times 5 = (2 \times 3)^2 \times \times (2 \times 5) = 6^2 \times 10,$$

donde el 10 carece de cuadrados.

Evidentemente, n es un cuadrado si y solamente si su parte sin cuadrados es 1. Este hecho trivial sirve de fundamento a un método de largo alcance. El primer paso consiste en establecer una lista de los valores $\sigma_2(p) = 1 + p^2$ correspondientes a los números primos p, y hallar su parte sin cuadrados s. Expresemos s como producto de primos distintos y despreciemos los casos en que uno de los factores primos de s sea "demasiado grande"; a título de ejemplo, retendré los casos en que el factor sea menor o igual que 53, pero desecharé los que tengan 59 o más. (Tal elección, del todo arbitraria, reduce el número de casos y hace el método practicable; la cota se puede situar cuan alta se quiera.) Por ejemplo, $\sigma_2(31) = 962 = 2 \times 13 \times 37$, por lo que su parte sin cuadrados es $2 \times 13 \times 37$ y la añadimos a la lista; en cambio la parte sin cuadrados de $\sigma_2(37) = 2 \times 5 \times 137$ es $2 \times 5 \times 137$, que contiene un divisor primo demasiado grande, el 137. La verdad es que $1 + p^2$ parece carecer de cuadrados con bastante frecuencia, aunque no siempre (pruebe con $p = 13$).

Tabulemos los resultados como en la tabla D, en la que los cuadritos indican la aparición en s de un determinado factor. Así pues, la hilera $p = 31$ tiene cuadritos en las columnas 2, 13 y 37, que son los primos que dividen a la parte sin cuadrados de $\sigma_2(31)$. (Solamente aparecen primos de la forma $4m + 1$, más el 2, porque solamente tales primos pueden dividir a $p^2 + 1$.)

Observemos que tanto $\sigma_2(7)$ como $\sigma_2(41)$ tienen parte sin cuadrados igual a 2. Es decir, $\sigma_2(7) = 2a^2$ y $\sigma_2(41) = 2b^2$ para ciertos enteros a y b. Pero esto significa que $\sigma_2(7 \times 41)$ b. Pero esto significa que $\sigma_2(7 \times 41)$ $(2ab)^2$, que es un cuadrado. Y, efectivamente, $\sigma_2(287)$ es uno de los ejemplos dados por Descartes.

Para llegar ahora a la regla general, examinemos los casos $p = 5$, 7, 31 y 43. Se tiene

$$\sigma_2(5) = a^2 \times 2 \times 13$$
$$\sigma_2(7) = b^2 \times 2$$
$$\sigma_2(31) = c^2 \times 2 \times 13 \times 37$$
$$\sigma_2(43) = d^2 \times 2 \times 37$$

para diversos enteros a, b, c, d cuyos valores carecen de importancia aquí. Entonces, por la multiplicatividad,

$$\sigma_2(5 \times 7 \times 31 \times 43) = = a^2b^2c^2d^2 \times 2^4 \times 13^2 \times 37^2$$

que es igual al cuadrado perfecto $(abcd \times 2^2 \times 13 \times 37)^2$. En efecto, $\sigma_2(46\,655) = 2\,313\,610\,000 = 48\,100^2$

Si lo anterior funciona es porque las columnas correspondientes a $p = 5$, 7, 31 y 43 contienen cuatro cuadritos en la columna 2, dos en la columna 13 y dos en la columna 37: *todos números pares*. Podemos pues generar números n para los cuales $\sigma_2(n)$ sea un cuadrado seleccionando en la tabla hileras que contengan entre ellas un número par de cuadritos en cada columna. Resulta que esto es muy fácil de hacer: por ejemplo, elijamos dos columnas con el mismo número primo máximo y repasemos los primos en serie descendente, ajustándolos sobre la marcha. Al utilizar solamente números primos queda garantizada la condición de que los números sean "coprimos", necesaria para la multiplicatividad de σ_2.

El máximo ejemplo que he construido por este método es

$$\sigma_2(25\,831\,927\,966\,985) = = \sigma_2(5 \times 7 \times 31 \times 41 \times 73 \times \times 83 \times 239 \times 401) = 709\,554\,400\,319\,807\,703\,225\,760\,000 = (26\,637\,462\,347\,600)^2$$

Resulta posible generalizar un poco el método: permitamos que n sea un número *primario* (esto es, potencia de un número primo), cuidando, eso sí, de asegurarse de que las hileras seleccionadas tengan valores de n primos entre sí. Si se desean ensayar cotas mayores que 53, yo recomiendo sumar las filas 293, 313 y 463, cuyas partes sin cuadrados de $\sigma_2(n)$ son, respectivamente, $2 \times 17 \times 101$, $2 \times 5 \times 97 \times 101$ y $2 \times 5 \times 13 \times 17 \times 97$. De esta forma se hace intervenir a los nuevos factores primos 97 y 101.

Habiendo exorcizado mi obsesión por las sumas de divisores y las generalizaciones de los números perfectos, siento ahora confianza en poder retornar al siglo XX y llegar desde allí a mi primitivo destino, Ombilicus, sin ser retrotraído a los tiempos de Descartes. Me despedí cordialmente de él. Pero cuando me preparaba a partir le vi garrapatear números más y más grandes para los cuales σ_2 es un cuadrado, cubriendo con ellos una cuartilla tras otra. Pronto se quedó sin

material de escritura. Suspiró y extrajo de un cajón un cuaderno intacto. "Lo estaba reservando para una obra que he concebido", dijo. "Es todo el papel que tengo... pero habrá de ser sacrificado a causa más noble: al desarrollo de esa nueva y maravillosa idea suya!"

Parece razonable, consideré... *Aunque*... ¡*Cuidado*! ¿*No había causado Fermat un sinfín de problemas a los matemáticos posteriores, por la simple falta de un margen más amplio donde escribir*? Mis viajes por el tiempo rondaban siempre la paradoja y el desastre; había llegado la hora de ir con pies de plomo.

"¿Qué obra era esa que acabas de mencionar?

"Una sencilla idea que se me ha ocurrido sobre una manera de utilizar un cuadriculado para representar la geometría del plano mediante fórmulas algebraicas. Es cosa de poca importancia."

Soluciones

1. Escribamos

$$(2^{n+3} - 1)/(2^n + 1) =$$
$$= (2^{n+3} + 8)/(2^n + 1) - 9/(2^n + 1) =$$
$$= 8 - 9/(2^n + 1).$$

Cuando $n \geqslant 4$, $2^n + 1 > 9$, por lo que esta última fracción se encuentra entre 0 y 1.

2. *Reglas de Descartes*

• Si N es triperfecto, $\sigma(N) = 3N$ y si 3 no es divisor de N entonces $\sigma(3N) = 4\sigma(N) = 12N = 4(3N)$. Así que $3N$ es tetraperfecto.

• Escribamos $N = 3M$, donde M no es divisible por 3 ni por 5. Luego

$$\sigma(45N) = \sigma(3^3 \times 5 \times M) =$$
$$= \sigma(3^3)\,\sigma(5)\sigma(M) = 40 \times 6 \times \sigma(M).$$

Asimismo,

$$9M = \sigma(3M) = 4\sigma(M).$$

Por consiguiente

$$\sigma(45N) = 10 \times 6 \times 9M = 4(45N).$$

• Pongamos $N = 3M$ no siendo M divisible entre 3, 5, 7 ni 13. Así

$$\sigma(3 \times 7 \times 13 \times N) =$$
$$= \sigma(3^2 \times 7 \times 13 \times M) =$$
$$= \sigma(3^2)\sigma(7)\sigma(13)\sigma(M) =$$
$$= 13 \times 8 \times 14 \times \sigma(M).$$

Además, $9M = \sigma(3M)$, por lo que

$$\sigma(3 \times 7 \times 13 \times N) =$$
$$= 4 \times (3 \times 7 \times 13 \times N)$$

Libros

Gestión de la información, gripe, Real Sociedad, Hooke, álgebras de Boole y tecnología cuántica

Carlos Sánchez del Río, José A. Cabezas y Claude Hannoun, Luis Alonso, Josep Pla y José M.ª Sancho

IDEAS AND INFORMATION. MANAGING IN A HIGH-TECH WORLD, por Arno Penzias. W. W. Norton; Nueva York, 1989.

Uno de los hechos básicos que deben explicar las teorías cosmológicas es la existencia de una radiación de cuerpo negro a muy baja temperatura (3 kelvin) que empapa todo el universo y que fue descubierta en 1965 por Penzias y Wilson. Ambos recibieron el premio Nobel en 1979 por este descubrimiento estrechamente relacionado con el origen del universo.

Actualmente Arno Penzias es vicepresidente de investigación de los laboratorios Bell de AT&T, situados en Murray Hill, New Jersey. Estos grandes laboratorios no estatales cultivan tanto la ciencia pura como sus aplicaciones, especialmente en los dominios de las telecomunicaciones y de la informática.

Sirvan las líneas anteriores de presentación del autor del libro que me propongo comentar brevemente. La primera observación es que se trata de un libro raro en el sentido de que los computadores y los procesos de información son el esqueleto que sirve de excusa para que el autor exponga ideas muy variadas sobre nuestras actividades y actitudes en un mundo de alta tecnología. Por eso la obra es menos sistemática que lo que el lector espera. Este defecto, sin embargo, queda ampliamente compensado por la brillantez de Penzias, que es capaz de explicar cuestiones muy técnicas de manera que todo el mundo las entienda. Además, el libro tiene la virtud de no mitificar las nuevas tecnologías informáticas; estas tecnologías son útiles auxiliares del hombre, pero no pueden sustituir a las tareas específicamente humanas como son las tomas de decisiones.

En efecto, la inmensa cantidad de información que nos ofrecen los computadores sirven de base para tomar decisiones más acertadas que si nos guiásemos por la sola intuición, pero no debemos olvidar que un ordenador es simplemente una máquina que es capaz de hacer muy deprisa lo que cualquiera puede hacer mucho más lentamente. Y ello porque un computador es –nos dice el autor– una calculadora de bolsillo que aprieta sus propios botones y recuerda lo que ha hecho. Por eso puede efectuar operaciones aritméticas y lógicas a un ritmo muy rápido.

Para que un ordenador sea útil es preciso programarlo para que calcule según un modelo matemático que suponemos que representa una situación real que puede ser científica, comercial, administrativa o de cualquier otra índole. Y no es nada fácil conseguir que el modelo sea fiel a la realidad; el autor muestra ejemplos muy llamativos a este respecto; un mismo algoritmo excelente para comercializar piezas de repuesto para automóviles resultó un fracaso cuando se aplicó a una tienda de regalos.

Un tema al que el autor presta considerable atención es el problema de la utilización del lenguaje natural para la programación de los ordenadores. Como es sabido, usamos actualmente lenguajes de alto nivel que son cómodos, pero absolutamente rígidos. El análisis lingüístico moderno tiene en cuenta los aspectos semántico (relación de las palabras con las cosas), sintáctico (relación de unas palabras con otras) y pragmático (relación de las palabras con el contexto). Parece muy difícil que una máquina pueda llegar a tener en cuenta los tres aspectos que tan sencillamente percibimos los humanos.

La llamada "inteligencia artificial" requiere muchas matizaciones. Los sistemas expertos no tienen más conocimientos que los que el programador introdujo en el ordenador; lo que sí tiene la máquina es más memoria y más rapidez de acceso a ella y por eso puede responder inmediatamente a muchas cuestiones. Además pueden programarse los computadores de manera que den respuestas probabilísticas, lo que refuerza la impresión de que la máquina es inteligente. Pero se trata sólo de mera apariencia, porque un computador sólo tiene lógica y le falta la imaginación y el juicio que son propios de los seres humanos. Claro está que pueden hacerse ordenadores menos estúpidos mediante arquitecturas diferentes de las empleadas hasta ahora.

Es indudable que la presencia, cada vez más extensa, de los computadores en nuestra sociedad es el resultado de la aparición de los microprocesadores. Cada poco tiempo aumenta la densidad de circuitos que se incorporan a un pedacito de silicio. Además, las técnicas litográficas de fabricación de microprocesadores, memorias y otros circuitos están llegando a tal perfección, que no está lejano el día en que los circuitos altamente integrados sean más baratos que el envolvente y los conductores que los contienen. Esto es el resultado de un proceso acumulativo; cuanto más baratos más se usan y cuanto mayor es el mercado más económica resulta su fabricación. La consecuencia es que, en el futuro, casi cualquier producto industrial llevará incorporado un microprocesador para optimizar su funcionamiento.

La abundancia y baratura de los ordenadores de cualquier tipo ha puesto de manifiesto que el verdadero problema con que se enfrenta hoy la informática es la programación (el "software"). Se ha avanzado muchísimo desde los tiempos heroicos –hace treinta o cuarenta años– hasta hoy, pero la potencia de los ordenadores actuales es tal que se precisan programas complejísimos para aprovechar las posibilidades de la máquina.

Son importantes las reflexiones de Penzias en relación con el uso de la informática en el control de calidad. No se trata sólo del control de calidad de los productos que se fabrican en serie, aunque este control sea de gran trascendencia económica. La falta de información actualizada causa molestias a los usuarios de hospitales, grandes almacenes, compañías de seguros y empresas de todo tipo. Estas molestias y, a veces, frustraciones pueden evitarse o reducirse mediante la introducción masiva de ordenadores en ámbitos hasta ahora no considerados.

Un último aspecto que inquieta al autor del libro que reseñamos es el elemento humano dentro de la sociedad de alta tecnología que ya estamos empezando a vivir. Después de todo, las máquinas están hechas para los hombres y no al revés. Pero en nuestra civilización actual parece como si

la eficacia fuera inseparable del trabajo en equipo en el cual queda disuelta la iniciativa individual. No tiene por qué ser así, como nos muestra Penzias con tres ejemplos recientes. Tanto el descubrimiento del efecto Hall cuántico, como el de superconductores de alta temperatura, como la invención del microscopio de barrido por efecto túnel son producto de uno o dos individuos con medios muy modestos. Es por tanto posible la coexistencia del trabajo en equipo con la iniciativa individual.

En el libro de Penzias hay muchas más ideas que las que se pueden mencionar aquí. Y además ideas acertadas y muy provechosas tanto para quienes se interesan por cuestiones científicas como para quienes vivan en la administración pública o en las empresas privadas. Y ello por una razón muy sencilla: el libro que he comentado es un cúmulo de sentido común. (C. S. R.)

THE INFLUENZA VIRUSES, dirigido por R. M. Krug. Plenum Press; Londres, 1989.

No resulta sorprendente el hecho de que aparezcan numerosas publicaciones (tanto trabajos de investigación como revisiones) referentes al virus de la gripe, si se toma en consideración lo que escribía en 1987 un especialista sobre el tema, E. D. Kilbourne –autor de *Influenza*–, al señalar que este virus, desde su aislamiento a partir de seres humanos en 1933, es "el mejor estudiado, pero pocas enfermedades [como la gripe] son menos comprendidas".

Quizá con mayor intensidad que en otros campos de la investigación, los incesantes avances que se vienen logrando a ritmo acelerado durante esta última década en el conocimiento del virus de la gripe incitan a la publicación en revistas de la especialidad, con escasas semanas de diferencia, de los hallazgos más novedosos. Pero es tal la complejidad del tema que, durante estos últimos años, raro será el ejemplar de revistas como *Virology, Journal of Virology* o *The Journal of General Virology* (por citar sólo tres de las más representativas) en que no aparezca algún interesante trabajo sobre este asunto.

Tal "presión editorial" se va a manifestar también en la relativamente frecuente aparición de revisiones o artículos monográficos acerca del virus de la gripe en colecciones como *Advances in Virology, Comprehensive Virology, Current Topics in Microbiology, Annual Review in Microbiology, Annual Review in Biochemistry*, etcétera.

Lógicamente, esta necesidad de reunir y ordenar el acervo de datos sobre el tema, considerados como definitivos en el momento de la redacción (aunque a veces pronto modificados), aconseja la publicación de libros. Así, en 1985, la segunda edición *Influenza, the viruses and the disease*, de Ch. H. Stuart-Harris, G. C. Schild y J. S. Oxford, y, en 1987, el de E. D. Kilbourne, *Influenza*.

Dos años después de éste, ha aparecido el que es objeto del presente comentario. No es obra ni de un equipo de tres autores ni de autor único, como sucede en los dos citados antes, respectivamente, sino que Robert M. Krug es el director (exactamente, el "editor", en el sentido anglosajón del término). Además, es coautor (con otros tres) de un capítulo de los ocho que integran la obra. Los restantes han sido elaborados por un solo autor o por varios.

Entre los veinte autores (incluido Krug) de la obra –procedentes 17 de ellos de EE.UU., 2 de Gran Bretaña y 1 de Australia– figuran especialistas tan prestigiosos como P. M. Colman, quien contribuyó con Varghese y Laver al hallazgo de la inhabitual estructura tridimensional de la neuraminidasa o sialidasa, y al conocimiento de la estructura de los sitios catalítico y antigénico de esta enzima, descubrimientos publicados en *Nature* en 1983 que han constituido hitos decisivos en este progreso reciente. Asimismo, se hallan otras personalidades científicas de este campo, como P. Palese y M. G. Roth, por sólo mencionar algunas.

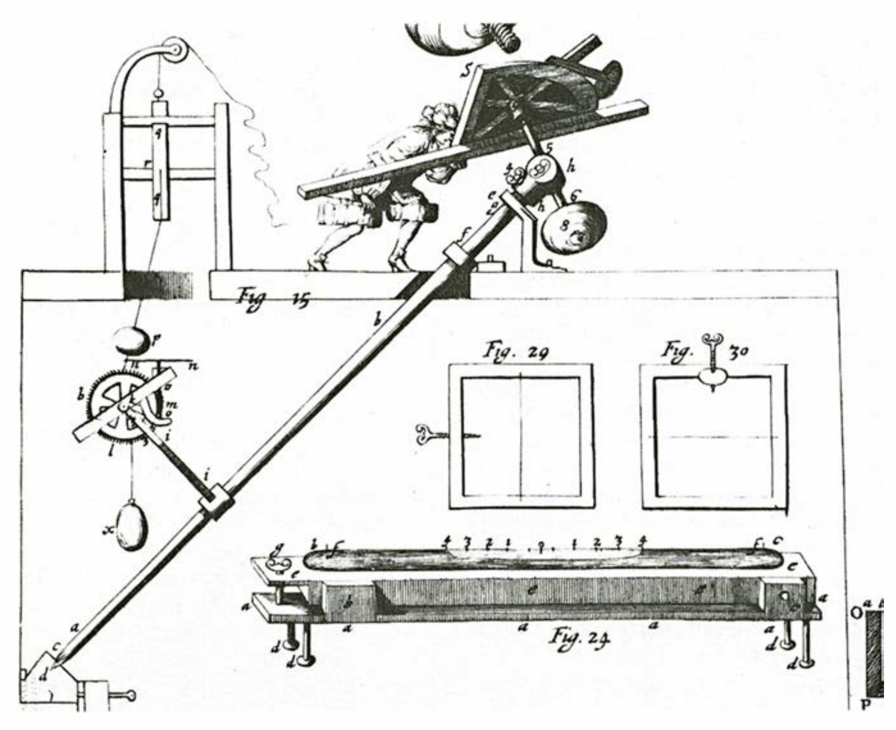
Probablemente la nota diferencial de esta obra respecto a las otras también dedicadas al complejo estudio del virus de la gripe ha sido –además de la lógica actualización de datos– el enfoque hacia "la biología molecular del virus", tal y como destaca Krug en el prólogo. En efecto, este enfoque se manifiesta a lo largo de los ocho capítulos que integran la obra, cuyo simple enunciado nos expresa su contenido. Este es: 1. "Genes y proteínas de los virus de la gripe" (R. A. Lamb); 2. "Expresión y replicación del genoma del virus de la gripe" (R. M. Krug, F. V. Alonso-Caplan, I. Julkunen y M. G. Katze); 3. "Estructura, función y antigenicidad de la hemaglutinina del virus de la gripe" (S. A. Wharton, W. Weis, J. J. Skehel y D. C. Wiley); 4. "Neuraminidasa: Enzima y antígeno" (P. M. Colman); 5. "Inserción en la membrana y transporte intracelular de las glicoproteínas del virus de la gripe" (M. G. Roth, M. J. Ghething y J. Sambrook); 6. "Estructura de ARN de virus de la gripe interferentes-defectuosos y su cometido en la interferencia (D. P. Nayak, T. Chambers y R. K. Akkina); 7. "Variación en los genes del virus de la gripe: Consecuencias epidemiológicas, patogénicas y evolutivas" (F. I. Smith y P. Palese), y 8. "Especificidad y función de los linfocitos *T* inducidos por virus de la gripe *A*" (J. Yewdell y Ch. Hackett).

Resulta evidente el tratamiento equilibrado concedido tanto a los aspectos tradicionales como a los más vanguardistas referentes al virus; o, mejor dicho, a *los virus* de la gripe. En efecto, si el virus de la gripe tipo *A* mantiene gran similitud con el tipo *B* (aunque nuevas investigaciones continúan confirmando las diferencias entre ellos), el virus tipo *C* se aparta notablemente de ambos, según se aprecia del estudio comparativo de las características de los tres a lo largo de varios capítulos del libro [y de otros trabajos posteriores: A. García Sastre et al., *"The Biochemical Journal"*, 273, 435-441], por lo que se está insistiendo en considerar al *C* como género distinto en la futura taxonomía de virus (J. A. Cabezas et al., *Intervirology*, en prensa).

Puede señalarse que los dos objetivos de la obra comentada –en parte coincidentes–, que son, según el editor: 1.º) la revisión (destinada a virólogos) de la investigación sobre los virus de la gripe, y 2.º) el dar a conocer a numerosos científicos el impacto que ha tenido la investigación de dichos virus sobre la biología molecular y la celular de los eucariontes y sobre la inmunología, han sido plenamente logrados. Esta última orientación relativa a la inmunología probablemente sea, además, otra de las particularidades más destacadas de este interesante libro. Por último, cabría añadir que, recíprocamente, las técnicas de la biología molecular aplicadas a este "modelo biológico" han facilitado una visión más profunda y amplia de algunos aspectos del tema que la hallada en otras obras, aunque este enfoque pueda, en ocasiones, hacer que la exacta comprensión de esos puntos quede reservada a los especialistas. (J. A. C. y C. H.)

STABLISHING THE NEW SCIENCE. THE EXPERIENCE OF THE EARLY ROYAL SOCIETY, por Michael Hunter. The Boydell Press; Woodbridge, 1989. **ROBERT HOOKE. NEW STUDIES**, preparado por Michael Hunter y Simon Schaffer. The Boydell Press; Woodbridge, 1989.

En aras de la objetividad debo anteponer dos prevenciones, quizás injustas, con que leo libros como el pri-



Cuadrante ecuatorial de Hooke (tomado de Animadversions on the First Part of the Machina Coelestis. *Londres, 1674*)

mero de la reseña. No me entusiasman los escritos de aluvión de la así llamada historia social de la ciencia, ni me muevo tranquilo entre páginas donde el autor remite constantemente a otras obras suyas. No acaba de convencerme la proclividad de los seguidores de Merton hacia el chascarrillo y rienda suelta de prejuicios personales so capa de explicar el "contexto" de tal idea o cual doctrina. Y cuando alguien envía constantemente al lector a otros libros suyos me produce la impresión de que me están estafando: si ya lo ha escrito, ¿por qué se repite? Si la novedad es mínima, ¿por qué no se limita a publicar un artículo?

Daré algún ejemplo. Al historiador social, a Hunter por lo menos, le importa más la relación de dependencia y patronazgo que Nehemiah Grew mantuvo con la Real Sociedad Londinense y algunos de sus miembros (Wilkins) que exponernos en qué consistían los experimentos botánicos que realizó ante la docta audiencia, cómo preparaba sus cortes, su descripción del polen o las partes de un cotiledón. Con respecto al ensimismamiento de la auto-referencia se corre el peligro de escribir lo siguiente: "One feature of my booke *Science and Society in Restoration England* (el libro más autocitado) which was universally well–received...", afirmación que se comprueba incorrecta en cuanto uno se toma la molestia y lee la crítica de esa obra en *Isis* (págs. 314-315 del año 1982).

La historiografía sobre la Regia Sociedad Londinense para el fomento del saber natural es muy densa en biografías de sus fundadores, presidentes o miembros destacados, en estudios de su incardinación en el marco político o ideológico (aires de tolerancia), en la fiebre de la ciencia que excita a Europa entera. No parece, empero, que se haya agotado el tema. Hunter cierra la obra con un examen somero de la bibliografía, copiosa, de la década de los ochenta para demostrar su permanente interés.

Queda bastante por conocer, sobre todo, de los primeros años, de las dos primeras décadas. A eso responde el esfuerzo de Hunter, que, nadie se lo discute, se maneja con experta desenvoltura en las fuentes documentales. El libro consta de nueve capítulos y dos apéndices. Más una larga introducción (43 páginas), que va remontando los pasos dados hacia la institucionalización de la ciencia a través de atenciones menos exquisitas (cómo sufragar los gastos, contratar técnicos foráneos o modo de llevar las reuniones) o más nobles (creación de fondos bibliográficos y materiales). Ofrece también la introducción los dibujos de John Evelyn sobre los escudos de armas y leyendas que se propusieron para la institución que nacía en 1660. Sabido es que cuajó la leyenda "nullius in verba" (no hay que guiarse por las solas palabras de nadie), pero hubo de competir con otras que rezuman idéntica voluntad experimentalista y afán de saber: "et augebitur scientia" (crecerá el conocimiento), tomado de un versículo del profeta Daniel; "omnia probate" (probarlo todo), de San Pablo a los Tesalonicenses; "rerum cognoscere causas" (conocer las causas de las cosas), de las *Geórgicas* de Virgilio; "Quantum nescimus" (es mucho lo que ignoramos); "ad majorem lumen" (hacia mayor luz); "quis dicere falsum audeat" (¿quién se atreverá a decir que –el Sol– es falso?); "experiundo: nullius in verba" (experimentando: sin guiarse por la palabra exclusiva de nadie).

Por otra razón es interesante el capítulo 2; se trata de un análisis crítico de las primeras crónicas de la Real Sociedad, la *History of the Royal Society of London for the Improving of Natural Knowledge*, de Thomas Sprat (1667), y la *History of the Royal Society of London*, de Thomas Birch (1756-1757). Las coteja con nuevos documentos. El resto hasta el capítulo nueve exclusive, ya publicado en buena parte, nos desgrana los pasos fallidos, los movimientos de presión y primeras reformas, sobre todo, vida diaria de la sociedad (libros de actas), gastos consuntivos, publicaciones, adquisiciones y relación paritaria y jerárquica dentro del consejo, así como con otras entidades.

Para la Sociedad, Robert Hooke fue en un comienzo mero asalariado; no perdería esa relación de dependencia ni siquiera cuando fuera elegido miembro de pleno derecho. De esa ligazón institucional se ocupa Hunter en el capítulo nono ("Science, Technology and Patronage: Robert Hooke and the Cutlerian Lectureship"), apartado que nos sirve de puente para entrar en el segundo libro, el dedicado a las últimas investigaciones sobre el autor de la *Micrographia*, recapituladas en un congreso celebrado en el verano de 1987. Hunter ilumina hasta los recovecos de la subvención de John Cutler del trabajo asignado por la Real Sociedad a Hooke, "mantenedor (curator) de experimentos", pero, una vez más, se abstiene en el umbral del contenido de las *lecturae cutlerianae*, clases pagadas por ese mecenas.

Quién era realmente Hooke nos lo cuenta Steven Shapin en el último capítulo del segundo libro de reseña. Por él debe empezar el lector. Sobre las múltiples biografías existentes des-

taca por enfrentarlo a un nuevo rostro de fondo, el de Boyle: dos conceptos de la vida, no del todo antagónicos pero tampoco convergentes. Al acostumbrado parangón con Newton se vuelve, quizás innecesariamente pues no aporta nada nuevo, en la introducción. (Esta trae, en compensación, un buen resumen de la evolución de los estudios hookianos.)

James A. Bennet nos enseña –él es "curator" en el sentido moderno del término– los instrumentos diseñados por Hooke para el desarrollo de la astronomía y la navegación, en particular para resolver el problema de la medición angular. Se entretiene en los componentes de su cuadrante ecuatorial, capaz de adaptarse a un cuadrante de altitud. El tallado y pulido de lentes, los reflectores y el microscopio compuesto son parte del tema investigado por Allen D. C. Simpson.

Muchos fueron los esfuerzos (con buenas recompensas como señuelo o incentivo) que se destinaron en el siglo XVII para determinar la longitud y el tiempo en mar abierto. Hooke echó su cuarto a espadas en un cronómetro marino, del que se ocupa Michael Wirght, en tanto que John T. Harwood aborda la importancia del dibujo científico de las estructuras observadas a través del microscopio y descritas en la *Micrographia*. Al método, y a la filosofía subyacente, consagra su largo ensayo John Henry, quien no logra borrar el baldón de mecanicista de segundo escalón con que ha pasado el Hooke teórico a la historia, pero apuntala por qué no tuvo par en la praxis de esa corriente de pensamiento. Más oscuro es su papel en la tradición hermética. (Este tema, que da pie a licencias y cábalas sin cuento, dista mucho de haber visto la luz, aunque el lector hallará una documentada explicación de la conexión de la magia, magnetismo, gravitación y acción a distancia durante el siglo XVII en las obras de Westfall sobre Newton.)

Relacionados con la teoría de la gravedad hay dos capítulos más: uno de cinemática y otro de geodinámica. Se echan en falta algunas páginas sobre la historia natural en Hooke, motivo de muchas observaciones micrográficas suyas. Cierto es que su conocimiento en este asunto dejaba que desear, pero puso los cimientos de una anatomía más fina y dio pie a clasificaciones más exigentes del totum revolutum que eran entonces los *Insecta*. (L. A.)

ALGEBRAS DE BOOLE Y LÓGICA, por Ignacio Jané. Publicacions Universitat de Barcelona; Barcelona, 1990.

A lo largo del siglo XIX tuvo lugar el nacimiento del álgebra abstracta. Este nacimiento se debe al intento de comprender, por un lado, cuestiones que hasta ahora habían pertenecido al dominio del álgebra, entendida como el arte de la resolución de las ecuaciones usuales. Había preguntas que era preciso responder: ¿es posible resolver por medio de radicales de los coeficientes la ecuación general de quinto grado?; y, si ello es posible, ¿por qué algunas ecuaciones de quinto grado, particulares, lo son y, en cambio, otras no lo son? Este tipo de preguntas llevaría a importantes matemáticos –Alexandre-Theophile Vandermonde, Joseph-Louis Lagrange, Paulo Ruffini, Niels Henrik Abel, Evariste Galois– a estudiar cuestiones que, con el tiempo, habrían de constituir la teoría abstracta de grupos, pues tuvieron que estudiar el comportamiento de ciertos grupos de transformaciones, así como la invariancia de ciertas funciones racionales.

Junto a este problema concreto, en el mundo de los entes matemáticos habían aparecido familias extrañas de objetos, provistos de ciertas operaciones aritméticas sometidas a las leyes usuales en la aritmética. La familia más importante de tales objetos la constituía el conjunto de los números complejos. Estos números, algebraicamente, tenían un comportamiento análogo al de los números reales; es decir, respetaban las mismas leyes aritméticas que los números reales. Ello hizo pensar en la posibilidad de estudiar estas nuevas familias de objetos de una forma más general –o, si se prefiere, más abstracta–, que atendiese no tanto a la naturaleza de los objetos en sí mismos cuanto a las leyes o propiedades aritméticas de las operaciones a las que se hallaban sometidos. Esta tarea fue llevada a cabo por la Sociedad Analítica de Cambridge gracias a los esfuerzos y aportaciones de George Peacock, William Rowan Sir Hamilton, Augustus De Morgan, George Boole y Arthur Cayley, entre otros.

Este juego aparentemente trivial adquirió consecuencias notables cuando los matemáticos Gaspar Wessel, Jean Robert Argand y Karl Friedrich Gauss lograron representar gráficamente los números complejos como puntos [o vectores] del plano sometidos a ciertas operaciones y, de una manera particular, cuando Hamilton intentó extender la teoría de los números complejos al espacio tridimensional. Dicha extensión, hoy lo sabemos perfectamente, no es posible. Sin embargo, Hamilton logró con sus cuaterniones extender los números complejos a cuatro dimensiones. Pero la extensión de Hamilton conculcaba una de las leyes aritméticas –la conmutatividad del producto– que hasta entonces se había considerado como irrenunciable.

Pronto harían su aparición en la escena de las matemáticas los vectores, las matrices, las transformaciones, etc., que tan fructíferos iban a resultar para un rápido progreso y para una clara y rigurosa presentación de la física matemática; no obstante, las operaciones aritméticas a que se hallaban sometidos estos objetos iban a contravenir alguna de las leyes aritméticas que se habían tenido como ciertas e irrenunciables. Se abría así un mundo de abstracciones en el que se hacía abstracción de los objetos concretos para estudiar con profundidad sus operaciones y las leyes a que dichas operaciones se hallaban sometidas. Así aparecieron las estructuras matemáticas clásicas, como los grupos, los anillos, los cuerpos, los espacios vectoriales, los sistemas hipercomplejos, etc.

En este contexto apareció la obra de George Boole. Como dice José Sanmartín, "Boole se une a quienes consideran el Algebra como un puro constructo formal, susceptible de interpretaciones diversas... Será esta la línea que Boole siga, desarrollando una lógica como (nueva) interpretación del Algebra simbólica". Y, para ello, Boole nos ofrece dos textos paradigmáticos destinados a matematizar –formalizar, si se prefiere– la lógica. Son: *The mathematical analysis of Logic* y *An investigation of the laws of thought, on which are founded the mathematical theories of logic and probabilities* ["Una investigación de las leyes del pensamiento, sobre las que están fundadas las teorías matemáticas de la lógica y las probabilidades]"; no añade ninguna cuestión nueva relativa a la formalización de la lógica. En estas obras, en cierto sentido análogas al *Organon* de Aristóteles por lo que el análisis de las leyes del pensamiento se refiere, George Boole estudiará las leyes fundamentales de las operaciones de la inteligencia por medio de las cuales se efectúa el razonamiento... con el fin de expresarlas en el lenguaje simbólico del álgebra de su época y sobre esa base edificar la ciencia de la lógica matemática, elaborando su método. En este intento sistematizador, Boole se distancia del filósofo griego, pues

el empeño de Boole es un empeño matematizador. Boole pretende formalizar, matematizar, las leyes del pensamiento y una vez logrado este objeto tratar los razonamientos lógicos como un simple cálculo aritmético o algebraico. Con George Boole, Augustus De Morgan, Charles Sanders Peirce, Ernest Schröder, nace la lógica matemática y, en particular, la lógica algebraica. Con George Boole, en definitiva, aparecen unas nuevas estructuras matemáticas a la sazón desconocidas: son las álgebras de Boole.

A partir de su mismo nacimiento las álgebras de Boole se constituyen en sí mismas en objeto de estudio puramente algebraico, olvidándose enseguida del origen lógico de su nacimiento. Este estudio se va acrecentando por su relación íntima con la teoría de la probabilidad; las álgebras de Boole constituyen el substrato algebraico natural de la teoría de la medida –y, en particular, de la probabilidad–. Así los sucesos aleatorios vinculados a un experimento concreto con sus leyes de composición forman un tipo especial de álgebra de Boole; sobre tales álgebras de Boole se definen las medidas de probabilidad. Son entonces las propiedades booleanas del álgebra de sucesos las que permiten matematizar la probabilidad y deducir probabilidades compuestas a partir de otras probabilidades más elementales, ya conocidas. Son asimismo las propiedades booleanas del álgebra de sucesos las que, junto con las de medida que posee la probabilidad, permiten establecer de forma natural las propiedades de la probabilidad, desarrollando la teoría de la probabilidad como una teoría matemática más. Así las álgebras de Boole entran de lleno en un dominio –el análisis matemático– de gran prestigio.

Además, gracias a los trabajos de Stone, Halmos y Alfred Tarski, las álgebras de Boole se vincularían también con otra rama de las matemáticas que, de la mano Henri Poincaré, adquiriría extraordinaria relevancia: la topología.

Con todo, durante más de cincuenta años, las álgebras de Boole parecen alejarse de sus orígenes –la lógica matemática–. Habrá que esperar a la algebraización de la lógica, a la teoría de modelos, al álgebra universal, llevada a cabo por David Hilbert, Alfred Tarski, Helena Rasiowa, Roman Sikorski y Dana Scott, entre otros, para que las álgebras de Boole retornen a la lógica.

Ignacio Jané, profesor de lógica de la Universidad de Barcelona, nos ofrece en este libro los frutos de un curso de segundo ciclo. Estos frutos adquieren, a mi entender, importancia por el énfasis que el autor pone en las relaciones existentes entre la teoría de las álgebras de Boole y la lógica clásica, énfasis que constituye 9 de los 27 apartados del libro –un tercio del mismo–. Cabe indicar además que siete de dichos apartados vinculan las álgebras de Boole con la topología.

Este libro es realmente un buen libro de referencia en álgebras de Boole y constituye una joya en lo que se refiere a los vínculos existentes entre la teoría de las álgebras de Boole y los cálculos clásicos de proposiciones y predicados, así como ciertos resultados de teoría de modelos. Como ya he indicado no es fácil hallar textos que ahonden en tales vínculos y que nos los ofrezca de forma ordenada y sistematizada. Este, en cambio, se lo propone como uno de sus objetivos y lo logra plenamente.

Entiendo, sin embargo, que el texto que nos ocupa es esencialmente un libro de referencia, un libro que tiene un lugar, pero cuya lectura requiere un conocimiento importante de lógica y de álgebras de Boole, si se quiere sacar de él un buen rendimiento. Si se carece de dicho conocimiento entonces debe ir acompañado de los consejos y tutoría de un profesor que pueda indicar, en una primera lectura, los centros de interés así como los distintos recorridos –algunos de los posibles recorridos son absolutamente independientes de los restantes– que el libro permite con toda naturalidad.

No me atrevería a hacerme eco de las palabras iniciales del autor del libro según las cuales "este libro es una introducción a la teoría de las álgebras de Boole...", aun cuando posiblemente son correctas, y no me atrevería a ello porque entiendo que el libro que nos ocupa adolece de ciertos defectos didácticos. Con ello quiero dar a entender lo siguiente y sólo lo siguiente: *Algebras de Boole y Lógica* es un excelente texto de consulta o de referencia al que pueden acudir en busca de rigor y precisión quienes, sumergidos en el tema, buscan ampliar una cuestión, matizarla o incluso enterarse de ella; no obstante, no es un libro en el que un neófito en el tema, por sí solo, pueda lograr una comprensión clara de los temas y cuestiones tratadas en él. Carece de una bibliografía a la que acudir para poder seguir más de cerca el tema de estudio ya sea desde sus orígenes históricos, ya sea mediante una presentación alternativa menos técnica, ya sea en una presentación y contexto alternativos; carece de ejemplos clarificadores y motivadores de las definiciones y de los teoremas y, finalmente, carece de ejercicios sencillos íntimamente vinculados al desarrollo mismo de cada cuestión que permitan al lector un aprendizaje y familiaridad inmediata de cada uno de los conceptos y resultados obtenidos. Ofrece, en cambio, un importante caudal de información que se ve completada en los Suplementos y Ejercicios que cierran cada una de las secciones. Pero también aquí se pretende ampliar el caudal informativo, pero no se busca un fin didáctico. Como nos advierte el propio autor "su contenido es un tanto heterogéneo". (J. P.)

PHYSICS OF QUANTUM ELECTRON DEVICES, por Federico Capasso. Springer Verlag; Berlín, 1990.

Antes de entrar en los comentarios quiero dar unos datos básicos, quizás útiles para aquellos lectores a los que el título no les resulte suficientemente claro.

Este es un libro muy técnico sobre un tema de mucha importancia, tanto teórica como aplicada, en los campos interdisciplinares de la física de sólidos y superficies (conducción electrónica), nuevos materiales (crecimiento epitaxial) y tecnología de dispositivos (nanolitografía), entre otros.

En palabras del autor-editor el propósito de este volumen, colección de trabajos de diferentes autores, es propiciar una discusión profunda y actual sobre los recientes e importantes logros en el área de los dispositivos semiconductores cuánticos, que, debido a su rápida expansión, es muy difícil de seguir al día.

Además de una introducción breve y explicativa, hay once trabajos que tratan de cubrir el tema bajo diferentes puntos de vista, tanto teórico, como experimental o puramente técnico. Resulta, pues, arduo para quien no se mueva con soltura en ramas de la física muy dispares: mecánica cuántica, estado sólido, microelectrónica o tecnología de superficies. Se dirige, pues, a investigadores de centros universitarios o especializados en el tema. Una vez establecidas estas premisas necesarias paso a comentar el contenido del volumen.

Cualquier persona que haya seguido la evolución de los computadores se habrá dado cuenta de que la miniaturización de los componentes integrantes de estas máquinas ha hecho posible su rápida expansión, abaratamiento y prestaciones a cualquier nivel en que los consideremos.

Pocas personas se han dado cuenta, sin embargo, de que dicha miniaturización ha sido posterior a avances teóricos importantes sobre las propiedades de los electrones en los semiconductores, que ha impulsado la fabricación de nuevos materiales con propiedades muy adecuadas para ejecución rápida de operaciones lógicas y de cálculo. Ya nadie se acuerda de las válvulas electrónicas, e incluso el transistor nos parece remanente fósil aunque quizá ni se sepa que su descubridor es contemporáneo. Así pues, resulta sencillo pensar que el proceso seguirá indefinidamente y que cada vez tendremos computadoras e instrumentos técnicos más reducidos porque la técnica de fabricación lo hará posible.

Sin embargo, basta con hacer un pequeño cálculo para darnos cuenta de que la miniaturización no puede seguir indefinidamente. En cuanto el tamaño de los componentes entra dentro de la escala cuántica los fenómenos físicos son otros, y se ha de rehacer tanto la teoría de su comportamiento como las técnicas de fabricación.

El volumen se encarga de anunciarnos que estamos ya en esa situación. Nos ilustra sobre la fenomenología que aparece en este caso, los problemas que se plantean y cómo se están resolviendo. A modo de ejemplo se prevé construir, este mismo año, puertas lógicas de un tamaño cercano a 2500 ångströms y cuyas partes son de dimensiones bastante inferiores (recuérdese que el "tamaño" del átomo de hidrógeno es de un ångström).

En estas circunstancias el electrón deja de tener la consideración de partícula, tan útil hasta ahora en la mayoría de los casos, para manifiestar un comportamiento ondulatorio que ineludiblemente se ha de abordar mediante los métodos de la mecánica cuántica.

Todo esto ha sido posible gracias a un avance tecnológico: el descubrimiento de la técnica de flujo molecular epitaxial, juntamente con las técnicas nanolitográficas que se explican aquí a modo de fundamentos y material introductorio para la mayoría de los capítulos. A partir de esta técnica, y entre otras cosas, se fabrican los pozos cuánticos, que serán los ladrillos elementales en la arquitectura electrónica futura. Estos pozos de energía se encuentran emparedados entre capas de un grosor inferior a la longitud de onda térmica de De Broglie (del orden de 250 ångströms). La existencia previsible de estados discretos de energía en estos pozos ha sido demostrada y confirmada de diferentes formas, lo que abre perspectivas muy interesantes.

Como primeros ejemplos hay que destacar la construcción del diodo túnel resonante y el láser de pozo cuántico. Debido a los efectos cuánticos, el diodo túnel de doble barrera presenta una alta o baja transmisión para diferentes energías, que pueden controlarse. A su vez, mediante el láser de pozo cuántico, pueden conseguirse frecuencias de emisión a voluntad controlando por una parte al grosor del pozo o la corriente a través del mismo. Estos tipos de dispositivos cuánticos, reordenados de diferentes formas sobre un sustrato, abren perspectivas insospechadas para la futura informática, pues con ellos pueden construirse dispositivos biestables, que son las herramientas básicas para la lógica y el cálculo.

Otras posibilidades son el cable cuántico y el semiconductor de interferencia cuántico. En el primer caso puede controlarse la conductividad mediante un pozo lateral sometido a un voltaje que permite cambiar las propiedades de transmisión del cable. Y en el segundo ofrece la posibilidad de conseguir un efecto de transistor mediante la aplicación de un voltaje que controle la diferencia de fase de electrones propagándose a través de dos canales paralelos. Dispositivo que también puede usarse de interferómetro.

Todo esto permite prever una nueva era de dispositivos y arquitecturas mediante la construcción de múltiples combinaciones y superredes de dispositivos elementales con comportamientos muy diferentes de los actuales. En efecto, el acoplamiento de túnel cuántico entre dispositivos facilita la interconexión entre los mismos. Este aspecto, junto a la inherente presencia de multiestados discretos en los dispositivos cuánticos, llevará con toda seguridad a una nueva concepción de la arquitectura de los computadores basados en una lógica polivalente.

No debo omitir las posibilidades teóricas nuevas que conllevan estos dispositivos: física del ruido, fenómenos de transporte, baja dimensionalidad, desorden, defectos, inestabilidades, etc. Todo esto ha sido posible gracias a la interacción cooperativa entre áreas muy diferentes, lo que nos muestra y a la vez nos sirve de aviso de que una política científica de compartimientos estancos no es el camino adecuado si se quiere ir en el tren de los avances científicos. (J. M. S.)

Apuntes

Las substancias tóxicas que se transmiten a través del aire recorren a veces grandes distancias antes de depositarse en el suelo. Es famoso el ejemplo de la lluvia ácida. Eso explica que el DDT, prohibido en Estados Unidos y Canadá y lanzado en América Central o México, se haya encontrado en los Grandes Lagos o que investigadores de la Universidad Mc Gill de Montreal hallasen DDT y bifenil perclorato en una cadena alimentaria esquimal.

La hibridación constituye una fuente extraordinaria de conocimientos biológicos. Se le empezó por reconocer un destacado papel evolutivo y ecológico al aportar variabilidad genética y genotipos capaces de adaptarse a nuevos entornos, que ocuparían microhábitats intermedios o nichos ''híbridos''. Se les atribuyó también una estructura fisiológica intermedia entre las especies progenitoras. Pero esto último no parece ahora ser cierto, antes bien se ha comprobado que la fisiología de los híbridos se acerca más al de una de las especies de partida que a un presunto estatuto intermedio de híbrido ''ideal''.

De los vikingos, cuya era transcurre desde el año 800 hasta el 1050, la historia conoce sus expediciones ultramarinas y sus incursiones en Rusia. La arqueología comienza a exhumar sus raíces sedentarias. Las comunidades campesinas se dedicaban al cultivo rotativo de la cebada seguido por otro alternante (centeno, guisantes, nabos y lino). El ganado aportaba la carne y los productos de trueque. A cada familia correspondía una propiedad de 6–7 hectáreas, que cercaba con vallas.

Los materiales magnéticos no han podido seguir el paso de la reciente marcha triunfal de la electrónica de estado sólido. Si algún día se acompasaran, profetizábase, tendríamos circuitos electrónicos y fotónicos con propiedades únicas, gracias a la hibridación de sistemas semiconductores con metales ferromagnéticos. Los primeros ensayos, realizados con técnicas ya habituales de deposición en capa fina, han permitido conocer mejor la complejidad estructural de la interfase entre metal y semiconductor y las propiedades determinadas por la estructura; imaginar, en definitiva, nuevas aleaciones y mejores aislantes.

Sabido es que el concepto de fractal fue introducido en 1967 en un trabajo de Benoit Mandelbrot que llevaba por título: ''¿Qué longitud tiene la costa de Inglaterra?'' La longitud, respondía, depende de la escala. Cuanto más pequeña sea la escala tanto más se aproximará la longitud de la costa al valor infinito. Así se explica que estados vecinos presenten longitudes diferentes para su frontera común; en las enciclopedias españolas, por ejemplo, figuran como longitud de la frontera hispano-portuguesa 981 kilómetros, mientras que en las portuguesas se anotan 1214 kilómetros. En Portugal, que es un país más pequeño, se miden evidentemente las fronteras políticas con escalas menores.

Desde su descubrimiento en 1973, los pulsos de rayos gamma cósmicos se han mantenido en el grupo de los fenómenos astronómicos que esperan una respuesta. No han faltado explicaciones *ad hoc*: desde micrometeoros de antimateria que tropezarían con la heliopausa hasta inmensas explosiones que se desencadenarían en los primeros pasos de la vida del universo tras la gran explosión. La hipótesis mejor trenzada acaba de salir a la palestra: los pulsos de rayos gamma cósmicos procederían de seísmos producidos en la corteza sólida de las estrellas de neutrones de nuestra galaxia. Y eso es sólo el principio. Dentro del mismo marco teórico adquirirían sentido púlsares de rayos X y radiopúlsares.

Las cuestiones de terminología científica carecen de significación teórica, pero importan si sirven para evitar confusiones. Atrás quedaron, por ley y por desgracia, los años en que las lenguas clásicas eran materia propedéutica necesaria para la adquisición de cualquier saber académico. Fruto de ese bagaje fue la introducción, por ejemplo, del término *entropía* por Clausius en 1865. En el artículo matriz de la termodinámica –''Sobre las diferentes formas de las ecuaciones fundamentales de la teoría mecánica del calor y sus conveniencias en las aplicaciones'' (1865)– aduce, en su descargo por la creación del término, que los nombres de las magnitudes fundamentales deben ser tomados de las lenguas clásicas para que mantengan idéntica morfología en las lenguas contemporáneas. Aunque quizá no haga falta alcanzar el exquisito refinamiento de Maxwell: ''La mejor hora para leer en su lengua los clásicos griegos y latinos es después del desayuno, porque los periódicos o recortes del mismo jaez me traen disipación y abotargamiento.''